



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

EFEKTIVNÍ OBRÁBĚNÍ NOVÝCH KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

ON THE EFFECTIVE MACHINING OF NEW CERAMIC MATERIALS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Vendula Sámelová

ŠKOLITEL
SUPERVISOR

doc. Ing. Anton Humár, CSc.

BRNO 2018

Abstrakt

Pokročilá keramika se dlouhodobě drží na předních příčkách seznamů perspektivních materiálů pro high-tech aplikace. Nejčastějším problémem jsou vysoké náklady na design, výrobu a opracování keramických dílů. Hlavním smyslem rozvoje technik zpracování keramiky je tedy cenově přijatelná, velkoobjemová výroba. Disertační práce je zaměřena na broušení karbidu křemíku SiC. Jedná se o materiál, který díky svým vynikajícím vlastnostem, nachází uplatnění při konstrukci strojních součástí.

Hluboká znalost procesu broušení diamantovými kotouči je důležitá proto, že se jedná o jednu z dokončovacích metod obrábění a má tedy přímý vliv na kvalitu a pevnost dílů vyrobených z SiC. Stěžejní je zde otázka celkové kvality povrchu součástí po broušení diamantovým kotoučem a znalost faktorů, které mají na kvalitu povrchu vliv. Mezi tyto faktory patří zejména vibrace při broušení. Hlavním smyslem práce je vytvoření systému konkrétních vědecko-technických informací, které umožní aplikovat optimální technologické postupy při zpracování keramických součástí.

Teoretická část práce obsahuje rozbor současného stavu poznání v oblasti obrábění keramiky, detailní rozbor procesu broušení keramiky diamantovými kotouči, teorii zpracování signálu a rozbor metod hodnocení kvality povrchu. Experimentální část obsahuje analýzu a diskuzi výsledků získaných při monitorování procesu broušení karbidu křemíku diamantovým brousicím kotoučem. Různými diagnostickými metodami byla potvrzena přítomnost kmitání o frekvenci blízké otáčkové frekvenci nástroje, které mělo zásadní, negativní vliv na kvalitu povrchu vzorků. Vibrační diagnostikou byl lokalizován konkrétní zdroj kmitání (upnutí obrobku) a následně byl odstraněn.

Klíčová slova: pokročilá keramika, broušení, diamantový kotouč, vibrační analýza, drsnost povrchu

Abstract

Advanced ceramics have long held the front of the list of promising materials for high-tech applications. The most common problem is the high cost of design, production and machining of advanced ceramics parts. The main sense of advanced ceramics processing techniques development is affordable, high-volume production. The dissertation is focused on SiC silicon carbide grinding. SiC is used in the design of machine parts due to its excellent properties

The deep knowledge of the diamond wheel grinding process is important because it is one of the finishing methods and therefore has a direct impact on the quality and strength of the SiC parts. The key issue here is the overall surface quality of the parts after diamond wheel grinding and the knowledge of the factors that influence the surface quality. These include, in particular, grinding vibrations. The main purpose of the thesis is to create a system of specific scientific and technical information, which will allow applying optimal technological procedures in the processing of ceramic components.

The theoretical part of the thesis contains an analysis of the current state of the art in the advanced ceramics machining area, detailed analysis of the ceramics grinding with diamond grinding wheels, signal analysis theory and analysis of surface quality assessment methods. The experimental part contains analysis and discussion of the results obtained during the monitoring of the silicon carbide grinding process with a diamond grinding wheel. Various diagnostic methods have confirmed the presence of vibrations at a frequency close to the speed frequency of the grinding wheel, which had a significant, negative effect on the samples surface quality. Vibration diagnostics has identified a specific source of vibration (clamping of the workpiece) and it has been removed subsequently.

Key words: advanced ceramics, grinding, diamond grinding wheel, analysis of vibrations, surface roughness

Bibliografická citace

SÁMELOVÁ, V. *Efektivní obrábění nových keramických materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 147 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Prohlášení autora o původu disertační práce

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracovala samostatně s použitím uvedené odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsem úplně a řádně citovala.

V Brně dne

Ing. Vendula Sámelová

Poděkování

Děkuji především mému školiteli, panu doc. Ing. Antonu Humárovi, CSc. za veškeré jeho vedení a cenné rady k mému výzkumu a vypracování disertační práce.

Děkuji také panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc., řediteli Ústavu strojírenské technologie, FSI VUT v Brně za podporu a zázemí, které mi na ústavu poskytl.

Oběma pánům bych ráda vyjádřila vděčnost za trpělivost, kterou projevíli zejména v době mého kombinovaného studia, kdy jsem musela skloubit studium se zaměstnáním a péčí o dceru, což se projevilo na mé studijní morálce.

Děkuji také ostatním přátelům a kolegům z Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně, zejména pak Ing. Martinu Madajovi, PhD., Ing. Martinu Slanému, PhD., Ing. Alexandře Sizove, Ing. Janu Dvořáčkovi, PhD., Ing. Zdeňkovi Fialovi, PhD., Ing. Aleši Jarošovi, PhD. a doc. Ing. Josefovi Sedlákov, PhD., za vstřícnost a ochotu mi kdykoliv poradit.

Děkuji dále společnosti Intemac Solutions, s.r.o. za možnost využít jejich přístroj Alicona IFM G4 a společnosti unIQsys s.r.o. za možnost využít systém strojového vidění.

Svůj hluboký vděk vyjadřuji mému manželovi Matejovi za pomoc a útěchu a také dceři Elence, zejména za neocenitelný čas, který mi poskytla při psaní disertační práce.

Za dlouhodobou oporu ve studiích děkuji svým rodičům. Zejména v době mého doktorského studia mi poskytli pomoc a podporu nad rámec možného.

Za podporu a možnost studovat děkuji také Jardovi Blažkovi.

Obsah

ÚVOD	9
1 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	11
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V OBLASTI OBRÁBĚNÍ KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ	12
2.1 STRUKTURA A VLASTNOSTI KERAMIKY A JEJICH VLIV NA OBROBITELNOST	12
2.2 METODY OBRÁBĚNÍ KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ	15
2.2.1 Abrazivní metody obrábění keramických materiálů	15
2.2.2 Obrábění ultrazvukem	17
2.2.3 Obrábění vodním paprskem	21
2.2.4 Obrábění s laserovou asistencí	22
2.2.5 Elektroerozivní obrábění	23
3 TEORETICKÁ VÝCHODISKA	26
3.1 BROUŠENÍ KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ	26
3.1.1 Mechanismus úběru materiálu abrazivním způsobem	26
3.1.2 Rovinné obvodové broušení	34
3.1.3 Řezná síla při broušení	39
3.1.4 Broušící nástroje	43
3.1.5 Broušící stroje – brusky	46
3.2 VIBRAČNÍ ANALÝZA	48
3.2.1 Kmitání	48
3.2.2 Teorie zpracování signálu	51
3.3 HODNOCENÍ POVRCHU	58
Parametry struktury povrchu	58
Techniky vyhodnocování struktury povrchu	61
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	68
4.1 EXPERIMENTÁLNÍ PODMÍNKY	68
4.1.1 Obráběný materiál	68
4.1.2 Použitý nástroj	70

4.1.3	<i>Použitý výrobní stroj</i>	70
4.1.4	<i>Měřicí technika</i>	71
4.2	PRŮBĚH EXPERIMENTU	74
4.3	VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ	77
4.3.1	<i>Analýza silového zatížení</i>	77
4.3.2	<i>Vibrační analýza</i>	90
4.3.3	<i>Analýza struktury povrchu</i>	99
4.4	OPAKOVANÝ EXPERIMENT	111
4.5	DISKUSE VÝSLEDKŮ A PERSPEKTIVA DALŠÍCH PRACÍ	118
ZÁVĚR		121
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		124
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ		139
SEZNAM OBRÁZKŮ		143
SEZNAM TABULEK		147

Úvod

Keramika, je v jedné ze svých mnoha definic, označena jako uměle připravená, anorganická, nekovová látka převážně krystalického charakteru, která je zpracována do požadovaného tvaru pomocí vysokoteplotního procesu [1; 2]. Toto vymezení je velmi široké, protože zahrnuje obě hlavní skupiny keramických materiálů, a to keramické materiály *tradiční* a *pokročilé*.

Tradiční keramické materiály patří (společně se dřevem a kamenem) k nejdéle používaným materiálům v lidské historii. Zároveň se jedná o první materiál, který byl člověkem vyroben uměle. Výchozími materiály pro jeho výrobu jsou přírodní suroviny, například kaolín, živec, křemičité písky nebo jíly [1]. V současnosti má keramika význam při výrobě stavebních hmot (cihlářské výrobky, střešní krytiny, dlažba, obklady), užitkových a okrasných produktů (sanitární keramika, porcelán, umělecké a dekorativní předměty). Kvůli přírodnímu základu tradičních keramických materiálů je zřejmé, že obsahují také značný podíl nečistot, které následně ovlivňují vlastnosti výrobků.

Vzhledem k prudkému rozvoji keramických materiálů a technologií jejich výroby jsou v současné době připravovány keramiky, které se vyznačují jedinečnými vlastnostmi. Tato keramika je připravena z chemicky čistých práškových surovin (syntetických) a označujeme ji jako pokročilou (z anglického termínu *advanced ceramics*; bývá také označována jako moderní, progresivní, konstrukční, atd.). Chemické složení a struktura takového materiálu jsou cíleně řízeny a ovlivňovány za účelem dosažení vyšších užitných vlastností. Tyto vlastnosti jsou podřízeny zamýšlenému použití daného keramického materiálu.

Pokročilou keramiku lze z hlediska složení rozdělit do dvou hlavních skupin – keramika *oxidová* a *neoxidová*. Pod pojmem oxidová keramika obvykle rozumíme keramiku, jejíž mikrostruktura je tvořena převážně jedním oxidem. Neoxidová keramika zahrnuje karbidy, nitridy, boridy, silicidy, atd. Mezi nejvýznamnější pokročilé keramické materiály patří oxid hlinitý Al_2O_3 , karbid křemíku SiC , nitrid křemíku Si_3N_4 , sialony (tuhé roztoky soustavy Si-Al-O-N) a oxid zirkoničitý ZrO_2 [1; 3; 4].

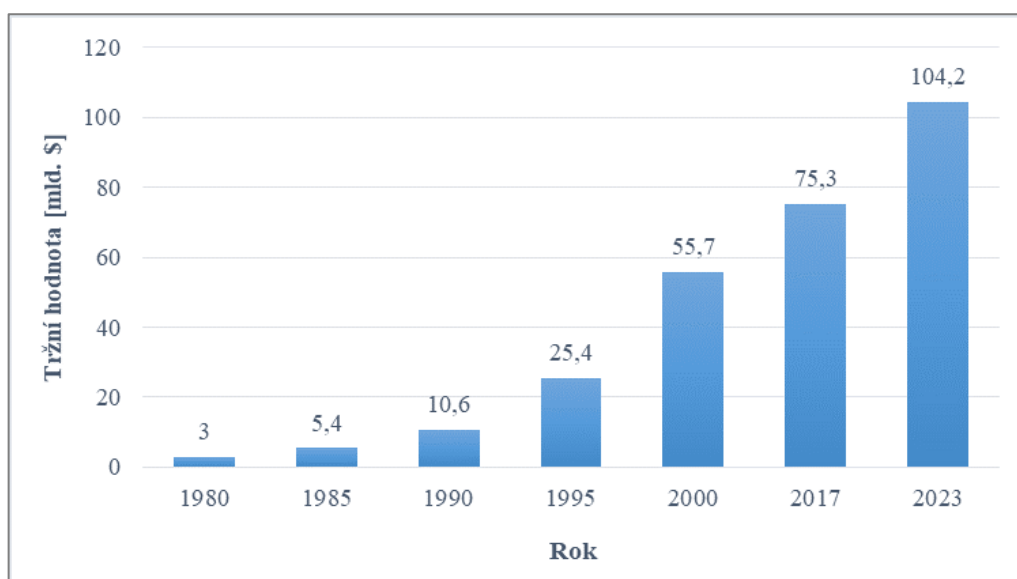
Charakteristické vlastnosti pokročilých keramických materiálů (vysoká tvrdost, nízká měrná hmotnost, vysoká pevnost za horka, odolnost vůči otěru, chemická odolnost, biokompatibilita atd.) předurčují oblasti jejich použití – otěruvzdorné součásti, ložiska, elektrochemická zařízení, tepelné stroje, biokeramika, vojenské a kosmické aplikace. V technologii obrábění je keramika využívána ve formě vysoce tvrdých abraziv (oxid hlinitý, karbid křemíku, karbid bóru, kubický nitrid bóru) a řezných nástrojů (například oxid hlinitý, oxid zirkoničitý, nitrid křemíku, Sialon). Keramické materiály, ať už ve formě objemových těles nebo ve formě silných vrstev či povlaků, se stále častěji prosazují v oblasti tzv. špičkových technologií, kde by i vysoce kvalitní kovové materiály byly na hranici svých možností.

V technické praxi jsou keramické materiály často využívány pro tribologické a

otěruvzdorné aplikace. Toto použití vyžaduje produkovat součásti s vysokou jakostí funkčních ploch. Kromě součástí využívaných v průmyslu (dynamická těsnění, trysky pro rozstřík abrazivních kapalin, mlecí kola pro abrazivní materiály, kluzná ložiska) je také kladen důraz na kvalitu povrchu umělých kloubů a zubních implantátů. Proto je důležité soustředit pozornost na výrobní procesy a jejich vliv na kvalitu funkčních povrchů. Zejména u keramických materiálů mají trhliny a jiná poškození povrchu přímý vliv na pevnost materiálu. Zde hrozí nebezpečí porušení součásti na základě nekontrolovatelného šíření trhliny u keramických dílů, které často pracují v extrémních podmínkách zatěžování s dlouhými servisními intervaly.

Aby bylo použití keramických materiálů ve špičkových aplikacích účelné, je třeba z nich vyrábět přesné součásti s malou drsností a s minimálním poškozením povrchu a toho lze dosáhnout obráběním. Hlavním problémem průmyslového využití keramiky jsou obtíže, které při obrábění vznikají. Důvodem je vysoká tvrdost a nízká lomová houževnatost keramiky. Tradiční metody obrábění nemohou být pro keramické materiály použity, proto je potřeba tyto metody modifikovat tak, aby byly použitelné, nebo je třeba vyvinout metody zcela nové.

Kritickým činitelem jsou také náklady na obrábění keramických materiálů, které tvoří 30-60 % z celkových nákladů na výrobu součásti a v některých případech to může být až 90 %. Náklady spojené s obráběním (a také samotnou výrobou) jsou hlavním důvodem, proč jsou stále v některých inženýrských aplikacích (letecký, automobilový průmysl) používány obráběné díly kovové a nikoliv keramické. Vývoj v oblasti keramických technologií a obrábění keramických materiálů byl v uplynulých dvaceti až třiceti letech prudký, což vedlo k produkci keramických materiálů s lepšími vlastnostmi a zároveň došlo i ke snížení nákladů na výrobu součástí. Tento vývoj byl užitečný, ale stále ještě není dostatečný. Zvyšující se využití keramických materiálů v průmyslu dokladuje vývojový graf na *Obr. 0.1*. Je zřejmé, že má smysl neustále vyvíjet a zlepšovat procesy výroby keramických součástí.



Obr. 0.1 Vývoj hodnoty trhu s keramickými materiály [5]

1 Vymezení řešené problematiky a cíle disertační práce

Keramika se dlouhodobě drží na předních příčkách seznamů perspektivních materiálů pro high-tech aplikace a tento trend se bude držet i nadále. Vývoj technologií výroby keramických součástí slibuje řešení celé řady problémů naší budoucnosti. Zvyšující se využití keramických materiálů v průmyslu je výzvou pro zpracovatele keramiky. Jedním z nejčastěji skloňovaných problémů jsou vysoké náklady na design, výrobu a opracování keramických dílů (vysoké výrobní náklady/nízká reprodukovatelnost při sériové výrobě). Hlavním smyslem rozvoje technik zpracování keramiky (včetně obrábění) je tedy **cenově přijatelná, velkoobjemová výroba**.

Disertační práce je z hlediska obráběného materiálu zaměřena na karbid křemíku SiC. Jedná se o materiál, který díky svým vynikajícím vlastnostem, nachází uplatnění při konstrukci strojních součástí. Vzhledem k široké škále použití v různých segmentech průmyslu má smysl zlepšovat procesy výroby součástí z SiC. Pro opracování slinutých keramických součástí se nejvíce uplatňuje broušení diamantovými kotouči. Závěry mnoha dřívějších výzkumů potvrzují, že broušení je jednou z nejúčinnějších metod výkonného obrábění pokročilých keramik.

Na základě výše uvedených skutečností, vyplývajících z provedeného rozboru stavu poznání v této oblasti, je zaměření disertační práce zúženo právě na problematiku broušení diamantovými kotouči.

Hluboká znalost tohoto procesu je důležitá proto, že se jedná o jednu z dokončovacích metod obrábění a má tedy přímý vliv na kvalitu a pevnost dílů vyrobených z SiC. Stěžejní je zde otázka celkové kvality povrchu součástí po broušení diamantovým kotoučem a znalost faktorů, které mají na kvalitu povrchu vliv. Hlavním smyslem práce je vytvoření systému konkrétních vědecko-technických informací, které umožní aplikovat optimální technologické postupy při zpracování keramických součástí.

Cílem teoretické části disertační práce je zejména kritické zhodnocení stavu poznání v oblasti tématu disertační práce. Konkrétně to zahrnuje tyto okruhy:

- úvod do problematiky obrábění keramiky zaměřený na strukturu a vlastnosti keramických materiálů a vliv vlastností na obrobitelnost keramiky,
- rozbor současného stavu poznání v oblasti obrábění keramických materiálů včetně posouzení vhodnosti použití různých metod obrábění a návrhu směřování budoucího vývoje,
- podrobný rozbor technologie broušení keramických materiálů,
- popis měřicích metod na hodnocení kvality procesu broušení a parametrů kvality povrchu.

Experimentální část práce zahrnuje realizaci experimentů zaměřených na broušení karbidu křemíku diamantovým kotoučem. Hlavními cíli experimentální části je:

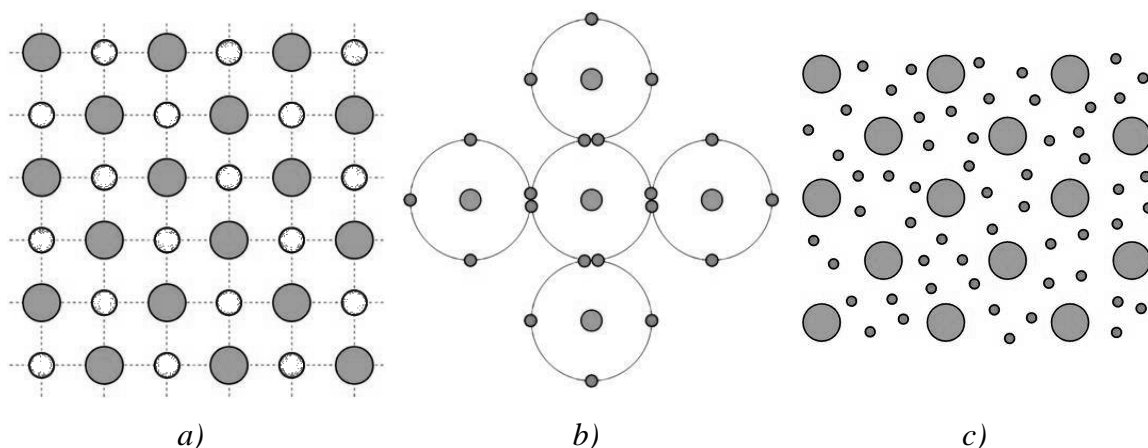
- sledování vlivu změny řezných podmínek na kvalitu povrchu,
- sledování procesu broušení prostřednictvím parametrů vibrací a silového zatížení a jejich vliv na kvalitu povrchu,
- hodnocení vhodnosti použitých výrobních prostředků pro opracování keramiky.

2 Současný stav poznání v oblasti obrábění keramických materiálů

2.1 Struktura a vlastnosti keramiky a jejich vliv na obrobitelnost

Struktura každého materiálu je dána typem vazby mezi atomy přítomnými v materiálu. Atomy v keramických materiálech jsou spojeny kovalentními vazbami, iontovými vazbami nebo kombinací obou typů vazeb. U většiny keramických materiálů má vazba mezi atomy iontově-kovalentní charakter. Iontový nebo kovalentní charakter vazby je v jednotlivých typech keramik velmi rozdílný. Například Al_2O_3 má převážně iontový charakter (z 63 %), zatímco SiC je téměř kovalentní sloučenina (z 89 %).

Většina pokročilých keramických materiálů má kubickou nebo hexagonální strukturu v těsném uspořádání aniontů. I přes převážně těsné uspořádání aniontů se vyskytují v krystalové mřížce prázdná místa, do kterých mohou vstoupit cizí atomy nebo ionty a také ionty vlastní krystalové mřížky mohou být těmito cizími ionty nahrazeny. Jedná se o bodové poruchy krystalové mřížky a významně ovlivňují technologické vlastnosti keramiky. Většina pokročilých keramik má strukturu krystalickou, ale mohou se v ní vyskytovat i podíly amorfni (skelné) fáze.

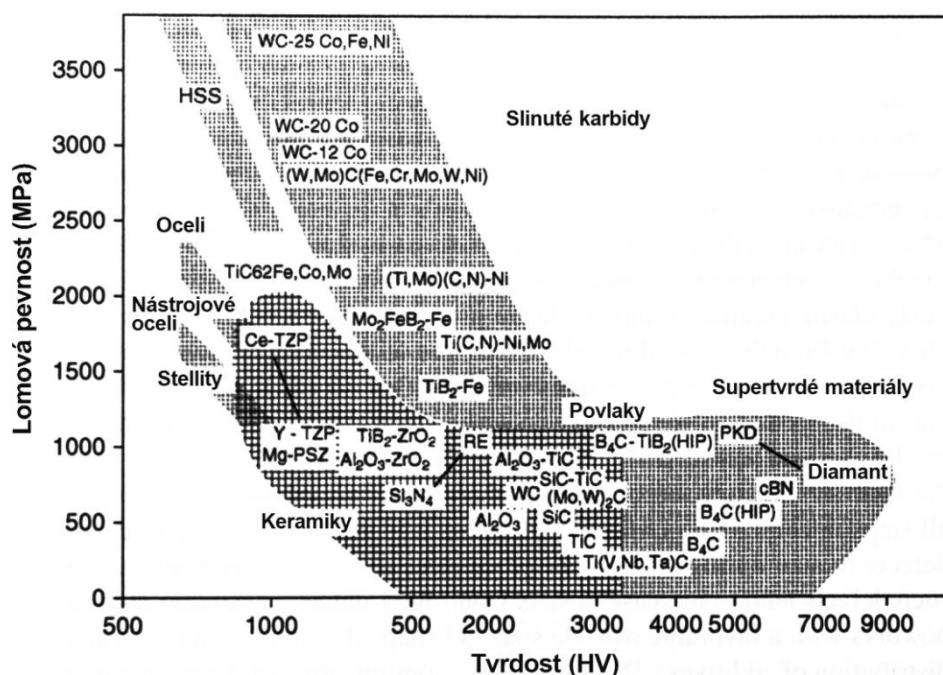


Obr. 2.1 Typy vazeb materiálech a) iontová vazba b) kovalentní vazba c) kovová vazba [6]

Z hlediska použití jednotlivých typů materiálů pro konstrukční aplikace a z hlediska možností jejich obrábění je zajímavé srovnání vlastností keramických materiálů s kovy. Plastická deformace v krystalických látkách (keramika i kovy) je způsobena pohybem dislokací v krystalové struktuře. V kovech, jejichž struktura je tvořena kovovou vazbou, dochází k plastické deformaci právě tímto mechanismem. Kovové dislokace se pohybují již při relativně nízkých napětích v důsledku nesměrové povahy kovové vazby, a protože všechny atomy zúčastňující se vazby mají stejné rozdělení hustot ve valenčních sférách. Typickými vlastnostmi kovů jsou tedy *tvárnost* a *houževnatost*. Naproti tomu iontová a kovalentní vazba v keramice způsobuje, že prakticky není schopna plastické deformace. Hlavními příčinami jsou špatná pohyblivost a manévrovatelnost dislokací ve struktuře

většiny keramických materiálů. V kovalentních krystalech a kovalentních keramikách dojde v důsledku působení napětí ke křehkému lomu v důsledku oddělení elektronových párů ve vazbě. Kovalentně vázané keramiky jsou proto *křehké* jak v monokrystalickém, tak v polykrystalickém stavu. Polykrystalické, iontově vázané keramiky jsou také *křehké*, přičemž k lomu dochází po hranicích zrn. Pouze u monokrystalických iontových keramik můžeme za určitých podmínek pozorovat značnou plasticitu. Obecně tedy můžeme tvrdit, že většina průmyslově významných keramik vykazuje nízkou *plasticitu*. Chování keramiky je tedy *elastické* až do porušení lomem a lze ji charakterizovat dvěma elastickými konstantami – modulem pružnosti E [MPa] a Poissonovým číslem μ [1].

Z mechanických vlastností skutečných materiálů je právě elasticita a například také *ideální pevnost* (maximálně dosažitelná) přímo závislá na vlastnostech chemické vazby (krystalové mřížky). V případě kovů i keramiky to znamená, že tyto vlastnosti jsou u nich srovnatelné, v některých případech může keramika kovy i předčít. Všechny neelastické vlastnosti jsou určeny poruchami struktury. U kovů se jedná o dislokace a u keramiky o trhliny, póry, inkluze nebo velká zrna vznikající během slinování. Tyto defekty omezují *pevnost* keramiky. Vady v křehkých materiálech jsou místa, kde se koncentruje napětí a v objemovém keramickém materiálu není možné je, při současném stavu poznání, úplně odstranit. Z toho plyne, že v něm bude vždy dostatek koncentrátorů napětí. Když napětí dosáhne kritické hodnoty, vzniká trhlina, která se šíří dále, protože v keramických materiálech nejsou žádné významné energii absorbující procesy. U výrazně křehkých materiálů nelze obecně považovat pevnost za materiálovou charakteristiku, protože závisí na obtížně kontrolovatelné velikosti trhlín, které rostou a šíří se, dokud nenastane lom a v konečném důsledku tedy závisí na technologii výroby každého konkrétního vzorku (součásti).



Obr. 2.2 Porovnání různých druhů materiálů v závislosti na tvrdosti a lomové pevnosti [7]

Lomová houževnatost K_{IC} [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$] je definována jako odolnost materiálů vůči šíření trhliny. Je tedy nejvýznamnější veličinou pro hodnocení mechanických vlastností keramiky. *Lomová houževnatost* keramiky je nízká, vzhledem k jejich iontově kovalentním vazbám, a je proto věnována velká pozornost jejímu zlepšování.

Keramické materiály mají mimo důležitých mechanických vlastností i další významné fyzikální a chemické vlastnosti, které určují oblast jejich použití a také metody, jimiž je možné danou keramiku obrábět. Každý typ keramického materiálu má specifické vlastnosti, je však možné obecně uvést výhodné vlastnosti, ale také jistá omezení ve srovnání s jinými materiály. Některé vlastnosti omezující použití keramiky v jedné aplikaci mohou být s výhodou využity v jiné aplikaci (například nízká tepelná vodivost způsobující praskání při teplotních rázech je s výhodou využívána při použití keramiky jako izolačního materiálu). Vlastnosti keramiky lze také vhodně kombinovat a cíleně měnit dle požadované funkce součásti.

Mezi omezení použití keramických materiálů patří také například obtížná a nákladná výroba a nízká reprodukovatelnost součástí, na druhé straně suroviny potřebné pro výrobu keramiky se vyskytují hojně a jsou dostupné.

Díky vysokým užitným vlastnostem je keramika velmi atraktivním materiálem pro mnoho inženýrských aplikací. Největší překážkou pohodlného konvenčního obrábění keramiky, jsou paradoxně právě její vlastnosti. Vysoká tvrdost a nízká lomová houževnatost keramiky způsobuje, že řezný nástroj vniká obtížně do povrchu obrobku a dochází tak k jeho enormnímu opotřebení nebo poškození. Křehkost keramiky usnadňuje tvoření trhlin, což je z pohledu tvoření třísky pozitivní [8]. Z hlediska funkce součásti je ovšem tento fakt nevýhodný. Jak již bylo uvedeno, množství trhlin má přímý vliv na pevnost keramických materiálů, a tedy na pevnost součástí. Z tohoto faktu plyne, že je buď velmi obtížné, nebo naprosto nemožné efektivně obrábět slinuté keramické polotovary nástroji s definovanou geometrií břitu.

Řešením výše zmíněné skutečnosti by bylo obrábění keramických materiálů v neslinutém (surovém) stavu (anglicky „green state“). Tento postup vykazuje i další výhody, například nižší náklady na obrábění, a proto je také v průmyslové praxi často používán. Na druhou stranu se zde vyskytuje také řada významných nevýhod. Součásti v surovém stavu mají výrazně nižší pevnost než slinuté součásti a je tedy poměrně obtížné s nimi manipulovat a také je upnout do obráběcího stroje. Jejich povrch může být snadno poškozen jednak samotným upínacím přípravkem, ale také například kontaktními metodami měření drsnosti povrchu součástí. Třísky, které při obrábění neslinutých součástí vznikají, jsou podobné „prachu“ a mají vysoce abrazivní vlastnosti. Během obrábění mohou poškodit jak povrch součásti, tak samotný obráběcí stroj. Jednou z největších nevýhod obrábění součástí v neslinutém stavu jsou změny rozměrů (smrštění), ke kterým dojde během slinování. Z toho je zřejmé, že pokud chceme vyrábět součásti s úzkými tolerancemi a vysokou kvalitou povrchu, nevyhneme se obrábění keramických součástí až po slinutí (anglicky „white machining“) [9].

Východiskem se také jeví technologie, pro které nejsou mechanické vlastnosti materiálu

překážkou. Jedná se o nekonvenční technologie obrábění. Při těchto metodách obrábění dochází k úběru materiálu obrobku účinky tepelnými, chemickými, případně mechanickými (převážně abrazivní účinek). Nedochází k působení mechanických sil obvyklých u třískového obrábění a netvoří se třísky, které vznikají při obrábění běžnými reznými nástroji. V těchto případech použití nekonvenčních metod obrábění nejsou mechanické vlastnosti obráběného materiálu tak významné, jako vlastnosti fyzikální nebo chemické.

2.2 Metody obrábění keramických materiálů

2.2.1 Abrazivní metody obrábění keramických materiálů

Abrazivní metody obrábění jsou charakterizovány použitím nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu a obecně představují nejvíce využívané metody při obrábění strojírenských součástí, u kterých jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost tvaru a rozměrů a drsnost povrchu obrobených ploch. Mezi abrazivní metody obrábění keramických součástí můžeme zařadit zejména:

- broušení,
- lapování,
- honování,
- superfinišování,
- leštění.

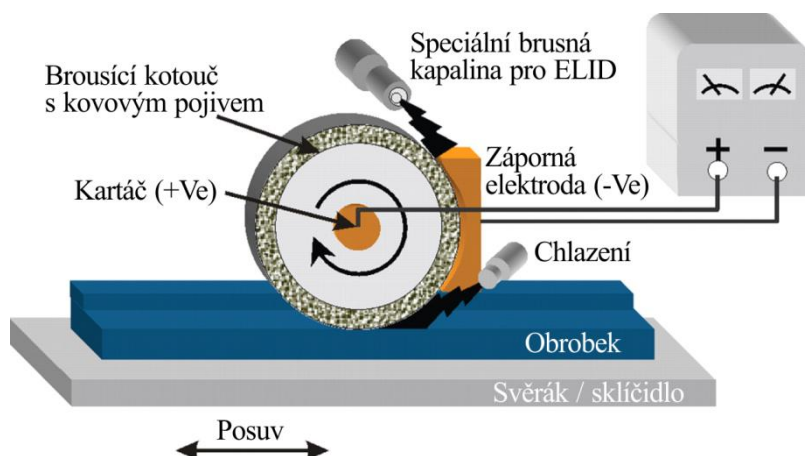
Významnou nevýhodou při výrobě keramických dílů jsou náklady spojené s těmito operacemi, které mohou být v některých případech až 80 % z nákladů na výrobu součásti, v porovnání s náklady na obrábění kovových součástí, které se pohybují v rozsahu 5-15 % [5]. Vysoká tvrdost keramiky vyžaduje vyšší brousicí síly a dochází k rychlému opotřebení zrn diamantového brousicího kotouče. Vysoce přesné broušení také vyžaduje použití tuhých strojů. Přitom úběr materiálu při broušení je nepřiměřeně nízký a může také docházet k poškození povrchu součástí ve formě mikrotrhlin. Ačkoliv je lapováním a leštěním odstraněno možné poškození povrchu, a je také zlepšena drsnost povrchu, jsou náklady a čas potřebný pro obě operace významnými nevýhodami. Bylo by proto vhodné vyrábět součásti z keramiky pokud možno bez potřeby operací následujících po broušení [10; 11; 12]. Aby bylo možné vyloučit z procesu obrábění keramických dílů leštění a lapování, musí mít broušený povrch vlastnosti dané těmito operacemi. V současnosti jsou tedy výzkumy směřovány k vývoji brousících metod, které by umožňovaly efektivně a přesně vyrábět keramické součásti při současné redukci nákladů. I přes snahu vyrábět keramické součásti co nejbližší konečnému tvaru za účelem snížení nákladů na výrobu, dokončovací, abrazivní metody obrábění jsou však stále nezbytné pro dodržení rozměrové a geometrické přesnosti součástí a zachování vysoké kvality povrchu [13].

Výrazný vliv na přesnost a výslednou kvalitu povrchu keramických součástí má mechanismus oddělování materiálu. Za určitých kontrolovaných podmínek je možné obrábět křehké materiály, u nichž dochází k oddělování materiálu obvykle křehkým lomem

(z anglického brittle fracture), pomocí mechanismu plastické deformace. Křehký materiál je tedy deformován jako tvárný (z anglického ductile regime machining, ductile mode machining). Povrch vytvořený tímto mechanismem neobsahuje mikrotrhliny, které často vedou k předčasnému selhání keramických dílů v průběhu jejich životnosti [9; 12-14]. Podrobněji o těchto mechanismech oddělování materiálu viz kapitola 3.1.

Za účelem zvýšení produktivity broušení keramických materiálů a zároveň zlepšení kvality povrchu je využíváno vysokorychlostní broušení (z anglického High Speed Grinding), které je v případě keramických materiálů charakterizováno rychlostí brousícího kotouče přesahující 120 m/s. Během procesu vysokorychlostního broušení mohla být snížena tloušťka třísky, a to vedlo ke snížení brousících sil. Zároveň se ukázalo, že má materiál tendenci se oddělovat tvárně (ductile regime). Bylo prokázáno, že po vysokorychlostním broušení keramických součástí nevykazuje povrch přítomnost zbytkových trhlin, charakteristických pro proces broušení, viz [15; 16]. Další podrobnosti lze nalézt v kapitole 3.1.

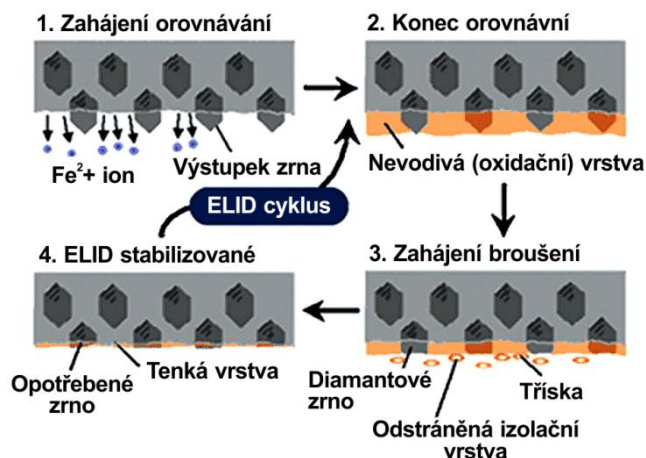
Mezi nejpřesnější brousící metody můžeme zařadit také **ELID broušení** (z angličtiny ELID grinding – Electrolytic In-process Dressing Grinding) [12; 13; 17; 18]. Jedná se o metodu vhodnou zejména pro dokončování součástí z materiálů těžko obrobitelných, u kterých je požadována vynikající kvalita povrchu (zrcadlově lesklý povrch), například křemíkové desky, optické čočky, asférická zrcadla, součástí z keramiky a skla, keramické povlaky, nebo také ložiskové oceli a CFRP (materiály zesílené uhlíkovými vlákny) [7, 19; 20]. Metoda umožňuje elektrolytické orovnávaní brousícího kotouče s kovovým pojivem během procesu broušení. Základní uspořádání systému pro ELID broušení je uvedeno na Obr. 2.3.



Obr. 2.3 Princip ELID broušení [12]

Podstatnými částmi procesu jsou brousící kotouč s kovovým pojivem, zdroj a elektrolytická kapalina s vysokým pH. Kotouč s kovovým pojivem je pomocí smooth brush kontaktu připojen na kladnou elektrodu napájení a fixní elektroda je připojena na záporný pól. Elektroda je vyrobená z mědi a musí pokrývat 1/6 aktivního povrchu kotouče šířkou, která je o 2 mm větší než je minimální tloušťka kotouče. Mezera mezi kotoučem a aktivním povrchem elektrody je 0,1 – 0,3 mm a může být mechanicky nastavena. Do

pracovní mezery je přiváděná vhodná elektrolytická kapalina a následně je do okruhu puštěn stejnosměrný proud. Brousicí kotouč je orovnáván v důsledku elektrolytického jevu, který vznikne mezi kotoučem a elektrodou ve chvíli kdy proud projde elektrolytickou kapalinou [7]. Mechanismus úběru materiálu pojiva v kotouči je schematicky uveden na Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Mechanismus elektrolytického orovnávání kotouče během broušení [21]

Broušení s elektrolytickým orovnáváním kotouče obecně vykazuje tyto výhody:

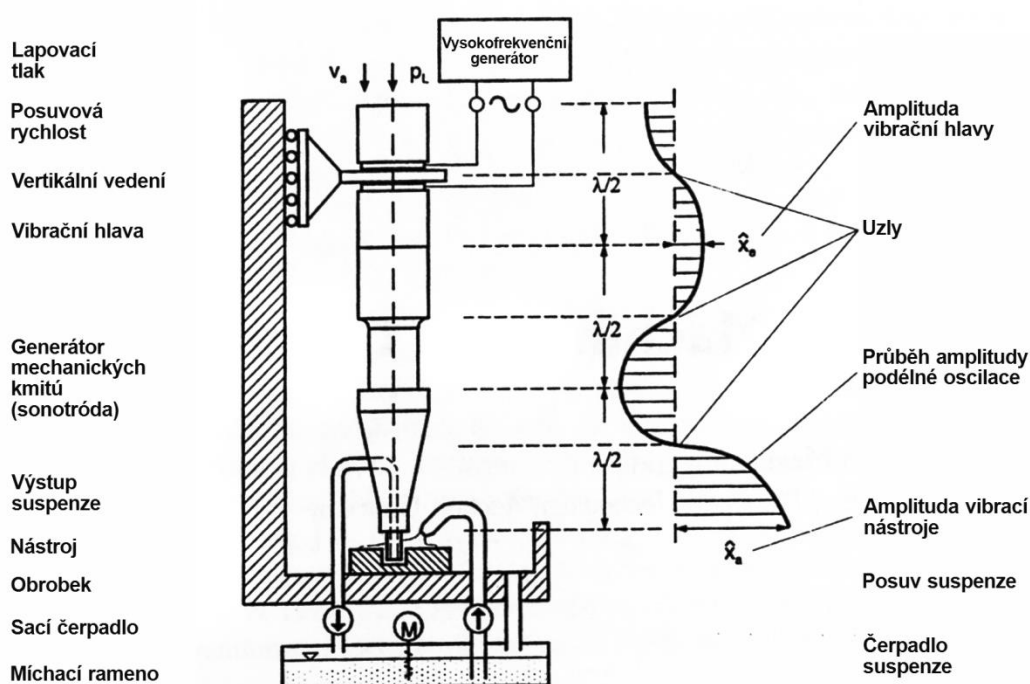
- možnost dokončovat povrchy křehkých materiálů extrémně přesně, řádově v nanometrech (4-6 nm),
- proces ELID broušení je stabilnější než konvenční způsob broušení a umožňuje vyšší úběr materiálu,
- správným výběrem řezných podmínek a kontrolou procesu je možné dosáhnout mechanismu úběru materiálu převážně tvárným způsobem,
- tvárního mechanismu úběru materiálu je možné dosáhnout i na konvenčních strojích s nižší tuhostí, pouze pomocí kontroly topografie kotouče,
- bylo prokázáno, že řezná i posuvová rychlost mají na výsledný povrch pouze malý vliv,
- během ELID broušení jsou řezné síly nižší, než u konvenčního procesu, již po prvním procesu orovnáání kotouče došlo k poklesu úrovně jejich hodnoty,
- hloubka vrstvy ovlivněné procesem ELID broušení je téměř poloviční, než je tomu například u honování.

Další konkrétní a podrobné údaje o procesu lze nalézt mimo jiné v [7].

2.2.2 Obrábění ultrazvukem

Princip ultrazvukového obrábění (Ultrasonic Machining – USM) je znám již od roku 1927 [9]. Ultrazvukové obráběcí stroje byly v průmyslu představeny již na počátku 50. let minulého století, avšak největší zájem zaznamenala tato technologie 80. v letech, kdy

došlo k rozvoji vysokopevnostních materiálů, korozivzdorných ocelí a slitin, pokročilé keramiky a kompozitních materiálů [22-24]. Ultrazvukové obrábění je ideální pro materiály tvrdé a křehké, které jsou konvenčními metodami složité obrobitelné. Je možné vyrábět komplikované tvary obrobků, obrábět velmi tenké materiály a otvory malých průměrů (méně než 1 mm). Během obrábění nedochází k tepelnému ani chemickému poškození obrobku, nedochází ke změnám mikrostruktury, chemických ani fyzikálních vlastností materiálu obrobku a v obrobeném povrchu se nenacházejí prakticky žádná zbytková napětí [9; 25]. Na Obr. 2.5 je uveden základní princip stroje pro ultrazvukové obrábění.



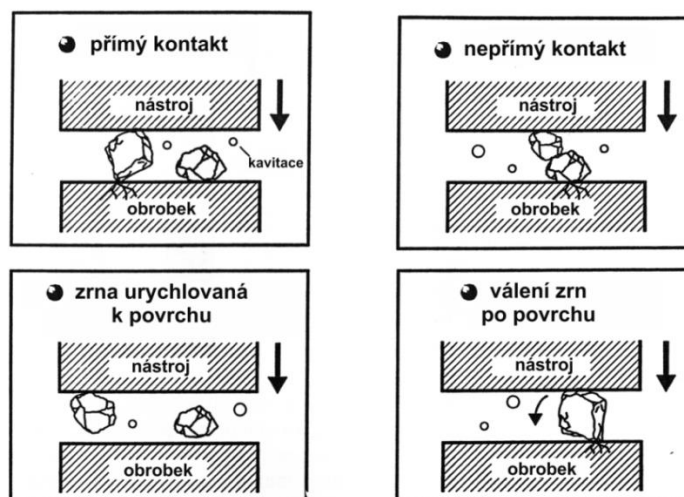
Obr. 2.5 Princip stroje pro obrábění ultrazvukem [9]

Během ultrazvukového obrábění kmitá obráběcí nástroj s frekvencí pohybující se kolem 20 kHz. Amplituda kmitů se pohybuje v rozsahu 5 – 100 μm [22-26]. Mezi nástroj a obráběný povrch je nepřetržitě přiváděna kapalina (obvykle voda) obsahující abrazivní částice (karbid boru, karbid křemíku, kubický nitrid boru, diamant). Základní požadavek při výběru abraziva je, že musí být tvrdší než obráběný materiál. Dalším důležitým kritériem je pevnost v tlaku, která musí být dostatečně vysoká. Pevnost v tlaku se zmenšuje se zvětšováním zrnitosti abraziva. Pro obrábění keramiky se v praxi nejčastěji používá karbid boru (B_4C), který projevuje vyšší odolnost proti lomu, než karbid křemíku (SiC) a je méně nákladný než diamant. Velikost abrazivních zrn používaná v praxi je nejčastěji 40-50 μm , což představuje dobrý kompromis mezi rychlostí úběru materiálu (s použitím hrubších zrn) a kvalitou povrchu (jemnější zrna) [9; 13].

Rozkmitané částice abraziva bombardují povrch obrobku, který je rozrušován. V konečném důsledku je z povrchu obrobku odebírán materiál ve formě drobných částic a tyto jsou následně odplavovány kapalinou přítomnou v mezeře mezi nástrojem a

obrobkem. Na *Obr. 2.6* jsou uvedeny mechanismy úběru materiálu, které společně působí při obrábění ultrazvukem. Jedná se o tyto účinky:

- přímý kontakt abraziva s povrchem obrobku,
- nepřímý kontakt abraziva s povrchem obrobku,
- urychlování zrn abraziva k povrchu,
- válení abraziva po povrchu,
- kavitaci.



Obr. 2.6 Schéma mechanismu úběru materiálu během ultrazvukového obrábění [9]

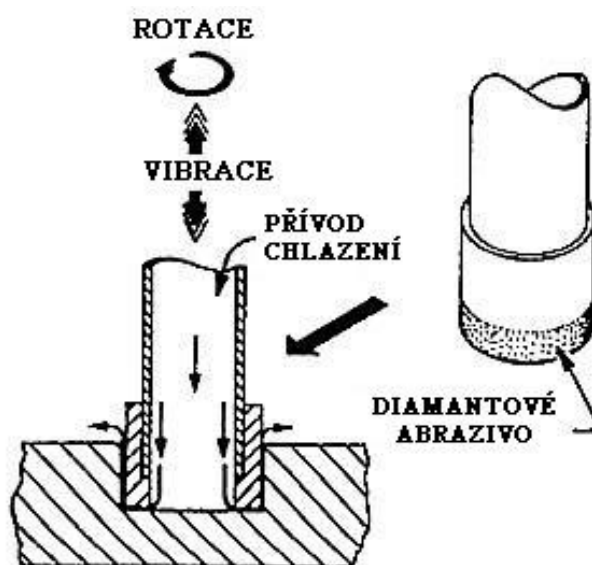
V současnosti existuje mnoho obráběcích metod, které využívají asistence ultrazvuku. Pokud byla konvenční obráběcí metoda (vrtání, soustružení, frézování, broušení, honování atd.) zkombinována s účinky ultrazvuku, došlo téměř vždy ke zlepšení výsledků výrobních procesů [8; 13].

Největšího pokroku bylo dosaženo v oblasti kombinace ultrazvukových kmitů s broušením. **Rotační ultrazvukové obrábění** (Rotary Ultrasonic Machining – RUM) je v současnosti již dobře zavedenou metodou obrábění tvrdých a křehkých materiálů. Jedná se o hybridní technologii kombinující broušení diamantovým kotoučem s ultrazvukovým obráběním. Výsledkem tohoto procesu je vyšší úběr materiálu, možnost snadněji vrtat hluboké díry s vyšší přesností a lepší kvalitou povrchu než prostým USM nebo broušením [9; 25]. Jedním z největších rozdílů mezi USM a RUM je, že USM využívá nástroj z relativně měkkého materiálu a kapalinu obsahující volné abrazivum, zatímco u RUM jsou tvrdé abrazivní částice (diamantové) pevně připojeny na nástroj. Tento nástroj vibruje a zároveň rotuje (u USM dochází pouze k vibracím). Volné abrazivum používané u USM poškozují stěny obráběných otvorů a zároveň dochází i úběru materiálu na nástroji. To snižuje možnost obrábět ultrazvukem v úzkých tolerancích. Tyto nevýhody jsou u RUM eliminovány [9].

Počátky technologie RUM sahají do 60. let minulého století [27]. V oblasti vývoje

RUM stojí za povšimnutí zejména práce Z. J. Peie a jeho spolupracovníků. Od počátku 90. let je možné sledovat pokroky, které tato technologie dělala až do její současné podoby. Z výsledků práce plyne, že společně s broušením je technologie RUM nejefektivnějším způsobem obrábění keramických materiálů [28- 37].

Pro RUM je možné použít brousicí nástroje různých tvarů. Zpočátku bylo možné touto metodou vyrábět pouze kruhové otvory (Rotary Ultrasonic Drilling - RUD), ale v současnosti je možné také frézovat až v 5 osách. Na Obr. 2.7 je zobrazena tato technologie ve své základní podobě. Na Obr. 2.8 je pokroková aplikace této technologie pro pětiosé obrábění keramického dílu.



Obr. 2.7 Schéma principu RUM [38]

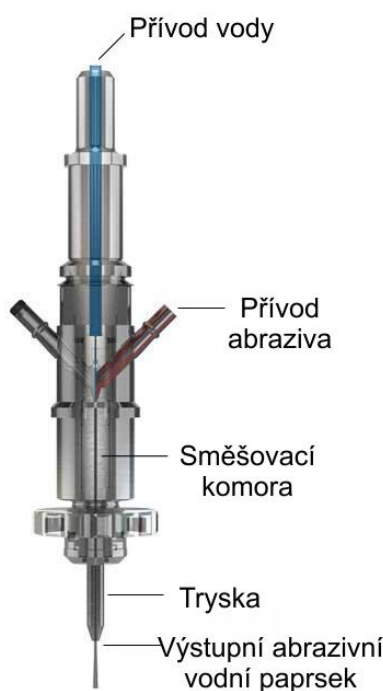


Obr. 2.8 Aplikace RUM – obrábění součásti z pokročilé keramiky [39]

2.2.3 Obrábění vodním paprskem

Metoda obrábění vodním paprskem (Water Jet Machining - WJM) využívá k oddělování materiálu vodní paprsek, který je vytvořen průchodem vody přes safírovou nebo diamantovou trysku malého průměru (0,07 – 1,3 mm). Tlakem vody, který běžně přesahuje 400 MPa, je možné dosáhnout rychlosti na výstupu trysky kolem $900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [9]. Současné komerční systémy mohou pracovat i s tlakem přesahujícím 600 MPa. Tato zařízení mají na výstupu z trysky rychlost téměř 4x vyšší než je rychlost zvuku [40].

Pro obrábění tvrdých materiálů (včetně pokročilé keramiky) se používá abrazivní vodní paprsek (AWJ – Abrasive Water Jet). Čistá voda je pod tlakem hnána ústím malého průměru do komory, kde dojde ke smísení s abrazivem. Směs je dále hnána trubicí ven z řezací hlavy. Takto připravený abrazivní vodní paprsek může řezat naprostou většinu známých materiálů.



Obr. 2.9 Tryska pro řezání abrazivním vodním paprskem [40]

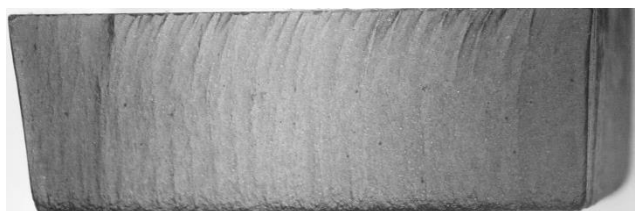
Další modifikací této technologie je obrábění abrazivní suspenzí (Abrasive Suspension Jet - ASJ) [9]. Základním rozdílem mezi AWJ a ASJ je, že u AWJ dochází ke smíchání vody s abrazivem až ve směšné komoře. Proud vody urychlí zrna abraziva ven s trysky. Při obrábění pomocí ASJ je použita předem smíchaná suspenze tvořená vodou a abrazivní směsí. Konstrukce ASJ řezací hlavy je podobná konstrukci hlavy pro obrábění čistým vodním paprskem.

K největším výhodám AWJ patří, kromě možnosti obrábět prakticky všechny materiály, také nízké síly během obrábění, možnost řezání v různých směrech a „studený“ řez (nedochází k tepelnému ovlivnění obrobků).

V předcházejících letech bylo AWJ využíváno především jako nástroje pro dělení

materiálu. V současnosti je pozornost věnována využití AWJ jako nástroje pro vrtání, soustružení, frézování, řezání závitů nebo leštění povrchu [9; 41- 44].

Obrábění vodním paprskem je možné využívat pro výrobu součástí, které nevyžadují vysokou přesnost a vynikající kvalitu povrchu, protože paprsek při vstupu do materiálu ztrácí svoji energii a dochází tak k jeho vychýlení z původního směru („váznutí paprsku“). Výsledkem tohoto jevu je zhoršená kvalita povrchu a zkosení řezané hrany [26; 45]. Technologie je vhodná pro výrobu dílů „téměř na hotovo“ (near-net-shape) z velmi tvrdých, jinými metodami těžko obrobitelných materiálů.



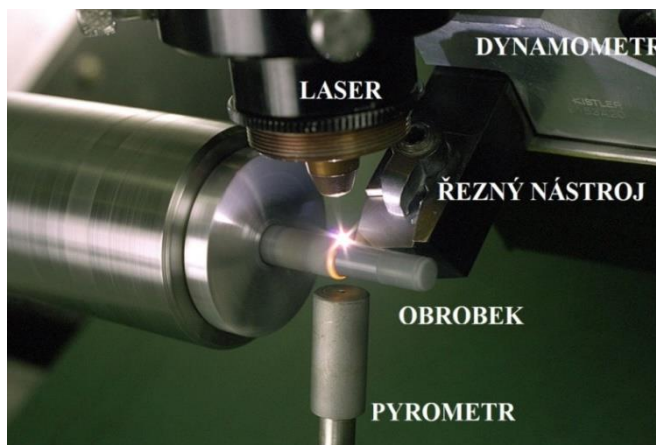
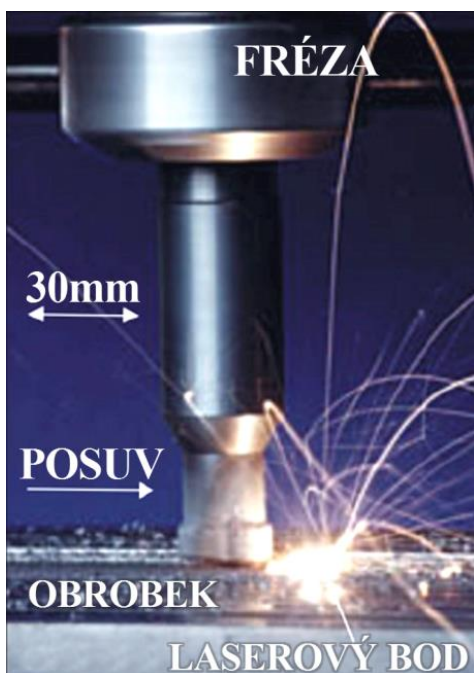
Obr. 2.10 Povrch vzorku z karbidu křemíku SiSiC vytvořený řezáním abrazivním vodním paprskem

Kvalitu řezu je možné zvýšit různými technikami řezání. Jedná se například o oscilační řezání, řezání s více průchody paprsku a řezání se změnou úhlu vodního paprsku [45-49].

2.2.4 Obrábění s laserovou asistencí

Technologie obrábění využívající nástroje s definovanou geometrií břitu (např. soustružení, frézování, vrtání) mohou být aplikovány pro obrábění keramiky jen ve velmi omezené míře. Použití těchto metod je buď nemožné, nebo během obrábění dochází k enormnímu opotřebení řezného nástroje a také poškození povrchu obrobku. Je ovšem možné konvenční metody obrábění modifikovat tak, aby bylo možné je uplatnit i pro keramické materiály. Jednou z možností je takzvané „horké obrábění“ (hot-machining technology), které využívá vysokých teplot k úpravě mechanických vlastností obráběného materiálu. Pevnost a tvrdost keramiky klesá natolik, že je možné využít podmínek konvenčního obrábění. K předehřevu obráběného materiálu je možné využít několik metod (indukční cívka, odporový ohřev, plynový hořák, plasma). Jako nejúčinnější se jeví předehřev obrobku laserovým paprskem z důvodu lokalizace velkého množství tepla na velmi malou plochu před čelem řezného nástroje [50].

Během obrábění za asistence laseru je laserový paprsek využíván jako zdroj tepla pro místní ohřev obráběného materiálu bezprostředně před řezným nástrojem. Povrchová vrstva materiálu absorbuje energii dodanou laserovým paprskem a tato je přeměněna na tepelnou energii. Rychlý ohřev povrchové vrstvy materiálu způsobí zhouževnatění materiálu obrobku [9; 51]. Soustava soustružení za asistence laseru je uvedena na *Obr. 2.11*.



a) Frézování s laserovou asistencí
[52]

b) Soustružení s laserovou asistencí [53]

Obr. 2.11 Příklady „horkého“ obrábění keramiky nástroji s definovanou geometrií břitu

2.2.5 Elektroerozivní obrábění

Elektroerozivní obrábění (Electrical Discharge Machining - EDM) je založeno na principu úběru materiálu periodicky se opakujícími výboji mezi elektrodami (nástrojová elektroda a obrobek). Z obráběného materiálu jsou tavením a vypařováním odstraňovány mikročástice, které jsou z oblasti obrábění odplavovány pomocí dielektrické kapaliny, v níž celý proces probíhá. Elektrody, vyrobené z vodivého materiálu, jsou k sobě přiblíženy na vzdálenost takzvané jiskrové mezery. Mezi elektrodami dochází k elektrickým výbojům, které rozrušují materiál obrobku. V místě výboje se vytvoří charakteristický kráter.

K největším výhodám EDM patří:

1. možnost obrábění materiálů bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti,
2. výroba součástí složitých trojrozměrných tvarů, s malými vnitřními rádiusy, které jsou jinými metodami nevyrobitelné.
3. velké množství hybridních variant technologie EDM (změna tvaru nástrojové elektrody, kombinace EDM s dalšími technologiemi),

Tyto výhody nabízejí možnosti využití technologie pro obrábění keramiky, která je inherentně tvrdá a křehká.

Navzdory výhodám, které nabízí technologie EDM, existují i nevýhody týkající se této technologie při obrábění keramických materiálů.

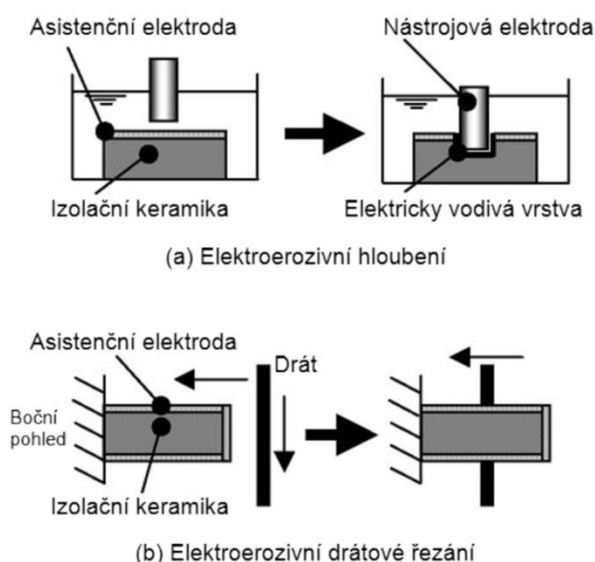
1. Není možné obrábět nevodivé materiály. Hraniční hodnota měrného elektrického odporu materiálu, která umožní obrábění pomocí EDM, se dle různých zdrojů pohybuje v rozsahu $(100 - 300) \Omega \cdot \text{cm}$. [54-68]
2. Nízký úběr materiálu – úběr materiálu je nižší než u konvenčního broušení a dokonce také nižší než u dalších nekonvenčních metod jako obrábění vodním paprskem, nebo obrábění laserem.
3. Nízká energetická účinnost - při obrábění je spotřebováno přibližně 18-50% vstupní energie. Nízká účinnost (10-20%) dále snižuje úběr materiálu.
4. Nástroje pro EDM. Nejen výroba EDM nástrojů je nákladný proces, ale také opotřebení nástrojových elektrod během procesu obrábění způsobuje nepřesnosti v obrobených součástech [54].

Keramické materiály mohou být z hlediska vodivosti rozděleny na:

- přirozeně vodivé (například SiC, B₄C), kdy elektrická vodivost je dostatečná pro EDM,
- zcela nevodivé (například Al₂O₃, ZrO₂) a
- vodivé s přidavkem dopantů, které změni vlastnosti základního materiálu.

Keramika přidavkem dopantů získá elektrickou vodivost. Může se jednat například o přídavek TiC, NbC, TiN, TiCN, TiB₂ a podobně [55; 56].

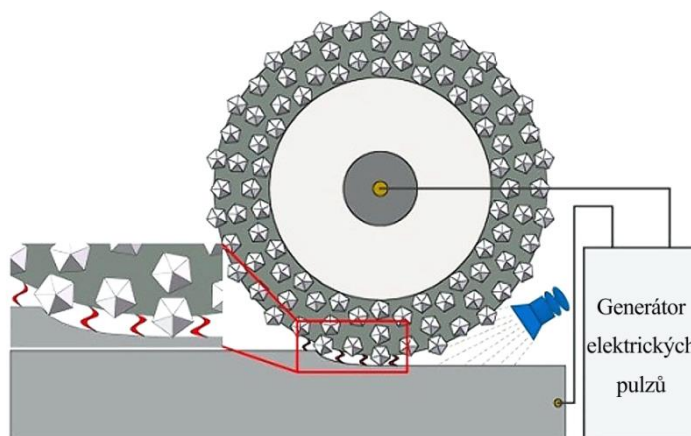
Zcela nevodivé keramiky mohou být metodou EDM obrobena s použitím tzv. *asistenční elektrody*. Keramický obrobek je potažen vrstvou elektricky vodivého materiálu. K úběru materiálu dochází ve dvou fázích. Generování výbojů se řídí elektricky vodivou vrstvou na povrchu a v další fázi dochází k úběru materiálu vlastního obrobku [57- 62].



Obr. 2.12 EDM pomocí asistenční elektrody ve dvou nejpoužívanějších modifikacích a) elektroerozivní hloubení, b) elektroerozivní drátové řezání [63]

EDM je používáno v několika progresivních modifikacích. Jedná se o elektroerozivní hloubení (Sinking EDM) a elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou (Wire Electrical Discharge Machining - WEDM), které jsou metodami dominantními a v průmyslové praxi běžně zavedenými.

Elektroerozivní broušení (Electrical Discharge Grinding – EDG), kombinuje broušení diamantovým kotoučem a EDM. Velkou výhodou tohoto hybridního procesu je orovnávání diamantového kotouče během procesu broušení, protože během elektroeroze je erodován, také materiál nástroje [64]. Princip metody je schematicky znázorněn na *Obr. 2.13*.



Obr. 2.13 Princip hybridní metody elektroerozivní broušení [64]

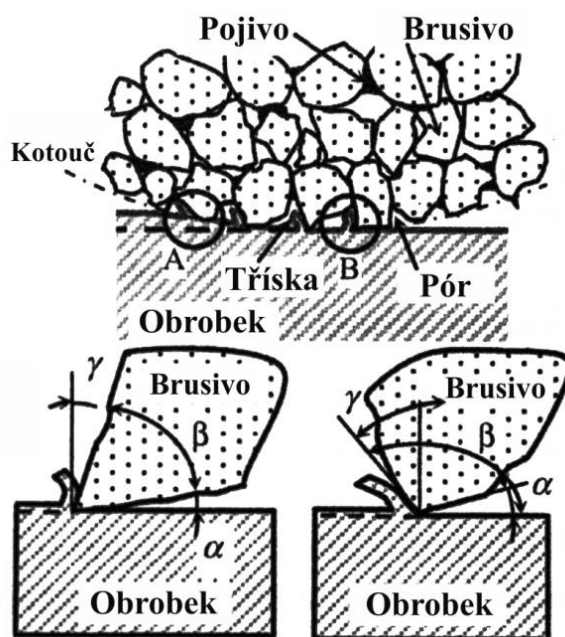
Micro-EDM (výroba otvorů a 3D tvarů v mikroskopickém měřítku) [65], elektroerozivní obrábění s rotující elektrodou (Rotating EDM - REDM) [66] nebo elektroerozivní frézování (Milling EDM - MEDM, nástrojová elektroda rotuje, posouvá se obrobek) [67; 68; 61] jsou poměrně nové metody založené na úběru materiálu pomocí elektroeroze a jsou také experimentálně aplikovány na keramické materiály.

Výzkumné i průmyslové zájmy směřují k vývoji hybridních metod, které jsou kombinací více obráběcích technologií. Ukázkou může být například sloučení elektroerozivního obrábění s ultrazvukovými kmity nástrojové elektrody (Ultrasonic assisted EDM - UEDM) [69-71].

3 Teoretická východiska

3.1 Broušení keramických materiálů

Broušení a řezání jsou mechanické procesy, pomocí nichž je odebírán materiál zanořováním řezného břitu nástroje do obrobku. Během řezání je materiál odebírán nástrojem, jehož břit má jasně definovanou geometrii, zatímco během broušení je úběr materiálu realizován velkým množstvím abrazivních zrn náhodně rozptýlených na obvodové vrstvě broušicího kotouče. Tato zrna mají nepravidelný, nestejný tvar a úhel čela jednoho zrna má velkou, zápornou hodnotu (viz Obr. 3.1). Abrazivní zrna jsou v brusném kotouči fixována pojivem, během broušení vypadávají do prostoru obrábění, lámou se a opotřebovávají. Podmínky obrábění se tedy během broušení mění. Broušení je využíváno jako hlavní dokončovací metoda obrábění, při které je možné využít velmi vysoké řezné rychlosti, avšak povrch obrobku je silně ovlivněn teplem vznikajícím v místě kontaktu nástroj – obrobek.



Obr. 3.1 Schéma zóny broušení a detaily dvou broušicích zrn v místě A a B [7]

3.1.1 Mechanismus úběru materiálu abrazivním způsobem

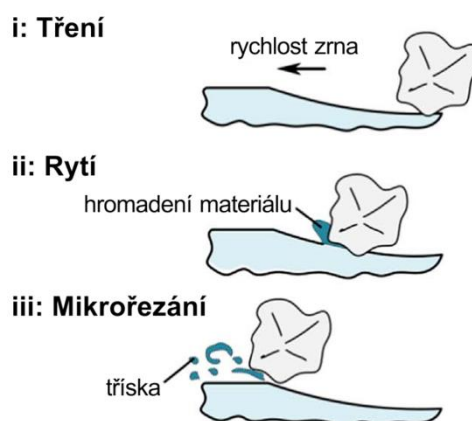
Tribologie abrazivního procesu

K zajištění vysoké kvality povrchu součástí vyrobených z křehkých materiálů je třeba identifikovat a používat odpovídající proces. Abrazivní proces úběru materiálu je možné zkoumat analytickými i experimentálními metodami a toto zkoumání zahrnuje *interakce vyskytující se v zóně broušení*. Zónu broušení můžeme charakterizovat jako místo, kde dochází ke kontaktu a také vzájemnému pohybu broušicího nástroje a obrobku. Nástroj a obrobek spolu tvoří třecí dvojici. Interakce v tomto místě lze tedy vhodně popsat

tribologickým přístupem. Pro každý abrazivní proces je možné definovat čtyři tribologické interakce v zóně broušení:

1. Abrazivum - obrobek,
2. Obrobek – pojivo,
3. Tříška – pojivo,
4. Tříška – obrobek.

Většina analýz vyšetřujících velikost úběru materiálu vychází z teorie takzvaného *mikrofrézování*, která zahrnuje analogii mezi úběrem materiálu frézovacího nástroje a brousícího kotouče. Z tohoto pohledu je zásadní interakce abrazivum – obrobek. Z tribologického pohledu je tento přístup zjednodušený. Rozmístění a geometrie brousících zrn na povrchu brousícího kotouče je náhodná a v průběhu procesu broušení se zrna modifikují. Tyto modifikace jsou způsobeny společným účinkem tří mechanismů: *mikrořezání*, *rytí* a *tření* (z anglického microcutting, plowing, rubbing), z nichž poslední dva jsou mechanismy charakterizující tribologický proces, viz Obr. 3.2.



Obr. 3.2 Mechanismy působící při broušení [72]

Pokud uvažujeme o broušení, jako o tribologickém procesu, musíme brát v úvahu opotřebení nástroje V_s a úběr materiálu obrobku V_w (objemy materiálu odebrané z nástroje a z obrobku). Poměrem obou veličin získáme **poměrný obrus G** , který je vhodným indikátorem životnosti nástroje, ceny nástroje a poskytuje informaci o vhodnosti výběru brousícího kotouče (účinnost kotouče).

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (3.1)$$

Cílem abrazivního procesu obrábění je zvýšit úběr materiálu obrobku při současné redukci opotřebení nástroje na co nejnížší hodnoty za účelem prodloužení jeho životnost. Obrobitelnost křehkých materiálů je nepřímo úměrná odolnosti daného broušeného materiálu proti abrazivnímu opotřebení. Zvyšování úběru materiálu je limitováno životností nástroje a snížením kvality broušené plochy. Vysoká kvalita broušeného povrchu a způsob a účinnost vzniku nově vytvořeného povrchu jsou základní požadavky při zkoumání všech abrazivních procesů [7].

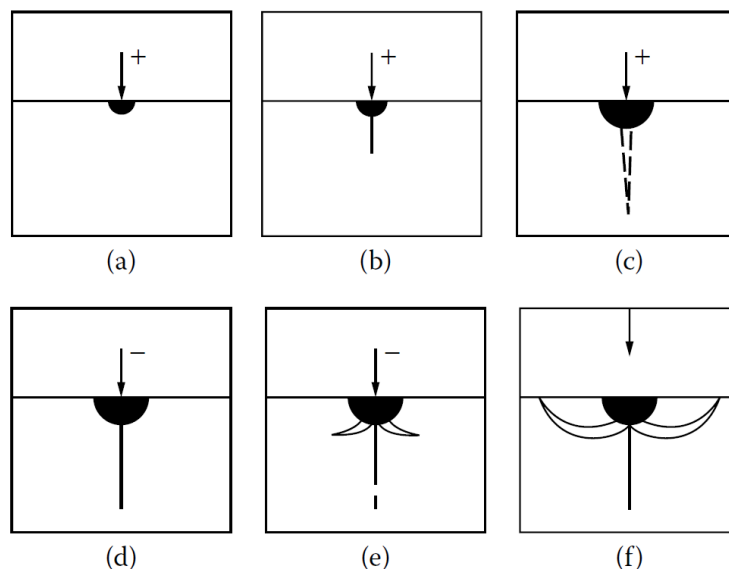
Metody zkoumání abrazivního procesu

Zkoumání abrazivního procesu je zásadní pro pochopení mechanismů úběru materiálu při obrábění pokročilé keramiky a chování diamantového abraziva během procesu obrábění. Většina předchozích výzkumů mechanismu broušení využívá buď indentačních zkoušek, nebo zkoumání vlastního procesu obrábění a vyhodnocení produktů obrábění.

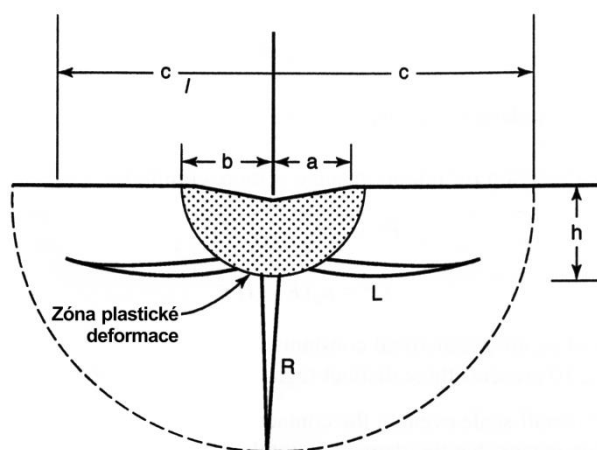
Pomocí **indentačních zkoušek** provádíme modelování zóny broušení, a to konkrétně interakci abrazivum – obrobek. Během zkoušek je pyramidový indentor vtlačován do materiálu, což představuje idealizovaný systém vniknutí zrna abraziva do materiálu při broušení. Následně sledujeme deformační a lomové chování materiálu. Pod vrcholem indentoru se nachází zóna plastické deformace, z níž vychází trhliny způsobené křehkým lomem. Jedná se o 2 skupiny trhlín – radiální (směřující do středu) a laterální (směřující do stran). Radiální trhliny jsou obvykle spojené se *snížením pevnosti materiálu* a laterální s *úběrem materiálu*. Rozvoj trhlín při indentační zkoušce je uveden na *Obr. 3.3* a schématický diagram chování křehkých materiálů (plastická deformace, radiální a laterální trhliny) při indentační zkoušce je uveden na *Obr. 3.4*.

Indentační zkoušky zahrnují buď statické zatěžování indentoru, nebo tangenciální zatěžování, pomocí pohybujícího se indentoru. Konkrétně se jedná o tyto metody:

- Pin-on-Disk,
- Fly-Milling,
- Scratching and Ploughing,
- Scratching and Indenting.



Obr. 3.3 Mechanismus tvorby trhlín při vtisku indentoru [7]



Obr. 3.4 Schématický diagram plastické deformace, radiálních (R) a laterálních (L) trhlin vznikajících při indentační zkoušce křehkých materiálů [7]

Druhá skupina metod zkoumání mechanismu broušení je zaměřena na vlastní proces broušení, který je ovlivněn celou řadou faktorů. Obecně je cílem těchto metod zjištění jak specifická energie broušení a poškození povrchu obrobku závisí na podmínkách broušení a vlastnostech materiálu. **Zkoumání procesu obrábění** zahrnuje zejména měření řezných sil spojené s mikroskopickým pozorováním morfologie povrchu a třísek, odebraných při broušení. Základním parametrem odvozeným z měření silového zatížení je specifická energie broušení. Ta je definována jako energie potřebná pro úběr jednotkového objemu materiálu. Každý mechanismus abrazivního úběru materiálu musí být konzistentní s velikostí měrné energie broušení, a to závisí na podmínkách broušení [7; 13].

Obecné modely úběru materiálu při abrazivních procesech

- **Oddělování materiálu křehkým lomem**

Keramické materiály jsou inherentně křehké a při zatížení vykazují žádné, nebo velmi nízké hodnoty plastické deformace. Z tohoto důvodu lze očekávat, že mechanismus oddělování třísky v místě interakce abrazivum – obrobek bude zahrnovat převážně křehký lom materiálu. Snímky obrobeného povrchu elektronovým mikroskopem ukazují oblasti, které jsou typicky „odlomené“, což prokazuje oddělení třísek křehkým lomem a také tvar a povrch třísek tuto skutečnost potvrzují. Nicméně pozorování také naznačují přítomnost plastického toku ve směru broušení. Snímky z transmisního elektronového mikroskopu odhalují husté dislokace, které jednoznačně dokazují přítomnost plastického toku. To naznačuje, že jak křehký lom, tak plastický tok hrají při broušení keramiky důležitou roli.

- **Oddělování materiálu tvárným způsobem**

Přechod z křehkého k tvárnému oddělování materiálu při malých hloubkách řezu může být popsán pomocí energie oddělování materiálu. Konkrétně, pro **malé hloubky řezu** je plastický tok materiálu energeticky méně náročný proces než křehký lom. Materiálová vlastnost charakterizující odolnost proti plastickému toku je mez kluzu R_e . Energie

potřebná k plastické deformaci konkrétního objemu materiálu V_p je definovaná jako:

$$E_p = R_e \cdot V_p \quad (3.2)$$

Materiálová vlastnost charakterizující odolnost proti lomu je Griffitův parametr šíření trhliny G_f . Energie potřebná ke křehkému lomu E_f je funkcí plochy nově vytvořeného povrchu A_f vzniklého tímto lomem:

$$E_f = G_f \cdot A_f \quad (3.3)$$

Pro hloubku řezu d je rozumné předpokládat, že hodnota V_p a A_f je vyjádřena pomocí hloubky řezu d , tedy:

$$V_p \sim d^3 \quad (3.4)$$

$$A_f \sim d^2 \quad (3.5)$$

Poměr obou energií je potom:

$$\frac{\text{Energie plastického toku}}{\text{Energie křehkého lomu}} \sim \frac{E_p}{E_f} \propto d \quad (3.6)$$

Hloubka řezu, při které dochází k přechodu mezi křehkým a tvárným režimem obrábění je funkcí vlastních vlastností materiálu řídících plastickou deformaci a křehký lom. Uvedenou úvahu lze generalizovat a označujeme ji jako „Hypotézu tvárneho režimu broušení“. Hypotéza tedy uvádí, že pro každý materiál platí, že pokud je hloubka řezu dostatečně nízká, dochází k oddělování třísky tvárným způsobem a nikoliv křehkým lomem.

Jedním z parametrů, který charakterizuje hloubku vniknutí jednoho brousicího zrna, je **maximální nedeformovaná tloušťka třísky** h_m . Vztah pro výpočet této charakteristiky je následující [73]:

$$h_m = \left(\frac{4}{C \cdot r} \cdot \left(\frac{v_f}{v_c} \right) \cdot \left(\frac{a_e}{d_e} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

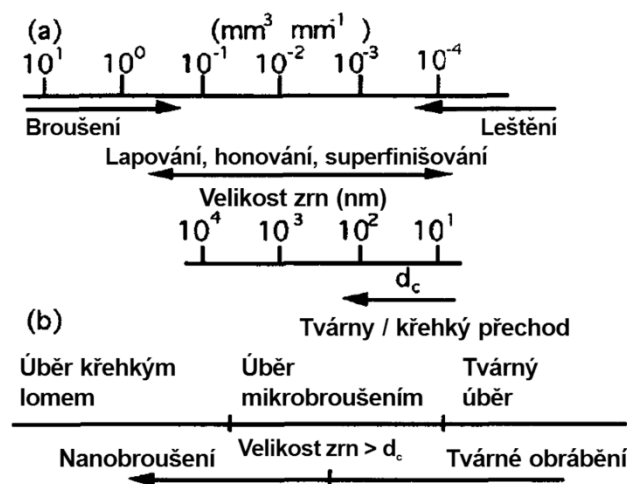
kde C je počet aktivních ostří na jednotku plochy (povrchová hustota zrn brusiva) [mm^2], r je poměr šířky k tloušťce třísky, při broušení je obvyklá hodnota 10-20, v_f je posuvová rychlost obrobku [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$], v_c je řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], viz (3.9), a_e je radiální posuv (hloubka záběru) [mm] a d_e je ekvivalent průměru brousicího kotouče [mm], viz (3.13).

Můžeme definovat **kritérium kritické hloubky řezu**, které znamená, že pokud je maximální nedeformovaná tloušťka třísky h_m při broušení menší než hloubka průniku jednoho brousicího zrna, při které dojde k iniciaci trhliny v materiálu (kritická hloubka řezu), bude broušení probíhat ve tvárném režimu. To znamená, že na povrchu se nebudou nacházet trhliny způsobené broušením. Výraz pro určení kritické hloubky řezu dle Bifana je [74]:

$$d_c = \beta \cdot \left(\frac{E}{HV} \right) \cdot \left(\frac{K_{IC}}{HV} \right)^2 \quad (3.8)$$

Kde β je konstanta, E je Youngův modul pružnosti [MPa], HV je tvrdost dle Vickerse [GPa] a K_{IC} je lomová houževnatost materiálu [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$].

Experimentální výsledky ukázaly, že pro přípustnou hodnotu přítomnosti trhlin na povrchu na úrovni 10 %, která byla navržena jako limit tvárného režimu, kritickou hloubku řezu v rozsahu 3 nm až 200 nm. Tyto výsledky potvrzují uvedené kritérium dobře za předpokladu, že hloubka řezu je rovna přísuvu stroje během broušení. Konstanta $\beta = 0,15$. Konkrétně například pro SiC je kritická hloubka řezu $d_c = 0,06 \mu\text{m}$. Uvedené výsledky však vychází z testování za použití konvenčních řezných rychlostí kolem 30 m/s, materiálové vlastnosti byly předpokládány konstantní a nebyl uvažován vliv deformační rychlosti a teploty.

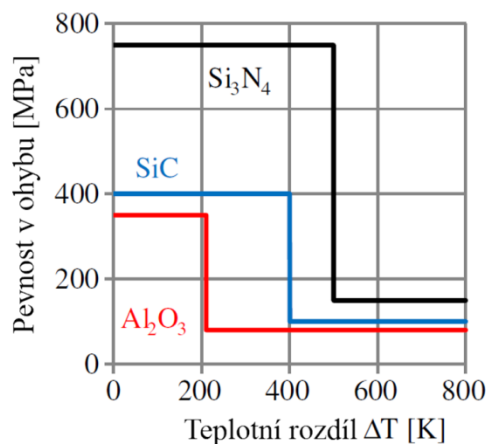


Obr. 3.5 Schéma přechodu mezi tvárným a křehkým úběrem dle Miyashita [75]

Vzorky, které jsou broušeny ve tvárném režimu, projevují zvýšenou pevnost i kvalitu povrchu. Ovšem v experimentech provedených na základě kritické hloubky řezu d_c za účelem dosažení tvárného režimu, byla omezena rychlost úběru materiálu, vzhledem k tomu, že hloubka řezu byla velmi nízká. Využití tohoto způsobu broušení je velmi pomalé a také nákladné. Další možnosti jak podpořit broušení v tvárném režimu a dosáhnout rozumnou míru úběru materiálu je **využití vysokých řezných rychlostí**. Vysoká rychlost broušícího kotouče redukuje nedeformovanou tloušťku třísky a je prokázána nižší měrná řezná síla, zvýšení plastického toku a snížení degradace pevnosti. Vysokorychlostní broušení je pro keramické materiály definováno od hodnoty rychlosti broušícího kotouče 120 m/s.

Zvyšování řezné rychlosti vede nevyhnutelně ke zvyšování teploty v místě interakce abrazivum – obrobek a také ke zvýšení deformační rychlosti. Během vysokorychlostního broušení dochází ke změně chování v místě kontaktu abraziva a křehkého obrobku. Na jednu stranu dojde ke zvýšení lomového napětí se zvyšujícím se deformační rychlostí, což

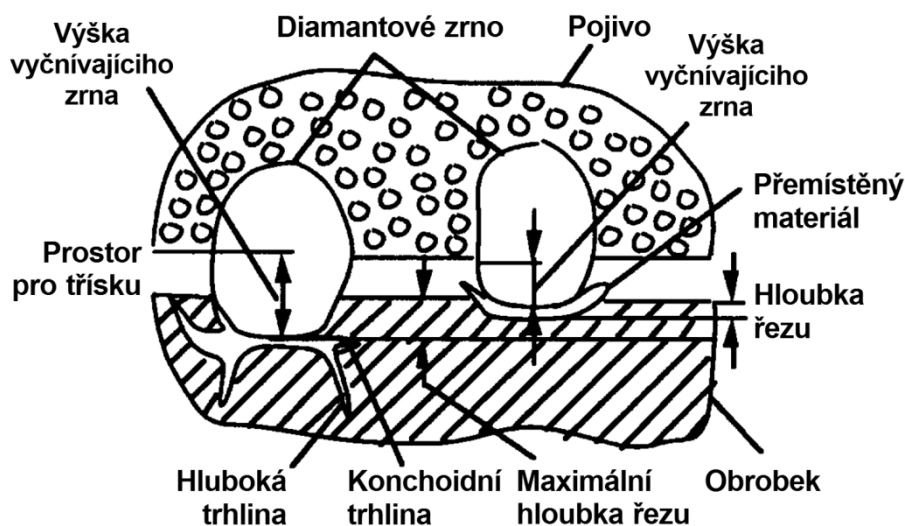
vede ke zvýšení lomové houževnatosti materiálu. Na druhé straně vysoká teplota při vysokorychlostním broušení vede ke snížení pevnosti v ohybu, tak aby hloubka řezu mohla být zásadně zvětšena, aniž by došlo k tvorbě trhlin.



Obr. 3.6 Vliv tepelného šoku na pevnost keramik [76]

- „Kombinovaný“ model oddělování třísky

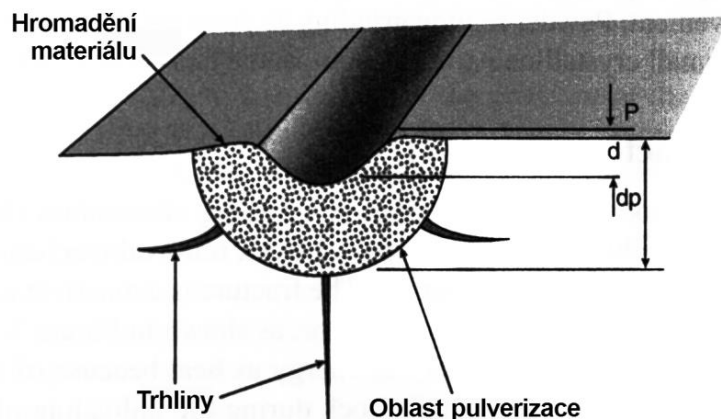
Pod pojmem „kombinovaný model“ oddělování materiálu je uvažována přechodová fáze mezi křehkým lomem a tvárným oddělováním, která vzniká při obrábění materiálu v režimu takzvaného „mikrobroušení“, viz Miyashitův graf na Obr. 3.5. Proces může být popsán také jako částečně tvárný. [7; 75; 77]. Vysvětlení procesu zjednodušeně poskytuje schématický Obr. 3.7 (upravená forma tohoto modelu oddělování třísky dle Koniga a Sinhoffa). Typické brousící zrno (v levé části obrázku) vytváří trhliny v materiálu, zatímco méně vyčnívající zrno (napravo) vytváří v materiálu tvárné pásy.



Obr. 3.7 Modifikovaný Konigův a Sinhoffův model vysvětlující broušení v částečně tvárném režimu [7]

• Model oddělování materiálu pulverizací

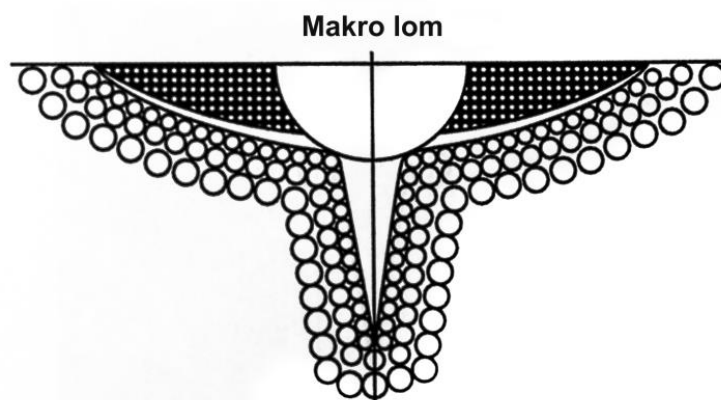
Jedná se o režim oddělování materiálu ve formě „prachových částic“ (z anglického Powder Regime Grinding Mode). V rámci hypotézy využití tohoto režimu je předpokladem úběr pomocí takzvané pulverizace materiálu. Princip je schematicky znázorněn na Obr. 3.8 [7]. Podle [78] je pulverizace důsledkem mikrotrhlin v povrchové vrstvě materiálu. Pokud je těchto trhlin dostatečné množství, může dojít k pulverizaci. Během fenoménu pulverizace v povrchové vrstvě dojde k výraznému zjemnění zrn a obrobený povrch se jeví hladší.



Obr. 3.8 Schéma zóny indukované v podpovrchové vrstvě materiálu během scratch-testu, která je ovlivněna pulverizací [7]

• Model oddělování pomocí dvojnásobného lomu

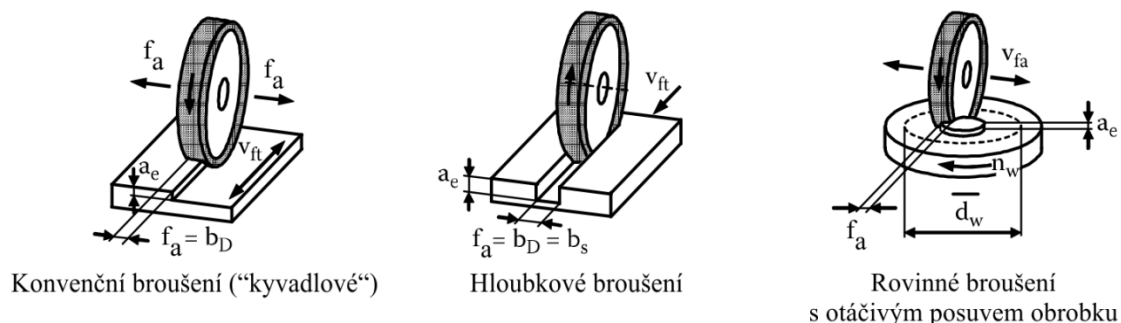
Model dvojnásobného lomu znamená, že během mikrobroušení keramiky je možné, aby docházelo ke dvěma typům mechanismů úběru materiálu, z nichž jeden je mechanismus dvojnásobného lomu. Tento lom je takzvaný *makrolom* a vznikne působením jednoho abrazivního zrna, které zapůsobí jako indentor. Tento model můžeme pozorovat například během technologie lapování. Další podrobnosti lze nalézt v [7; 79]. Jednoduché schéma makro-lomu je uvedeno na Obr. 3.9.



Obr. 3.9 Makrolom v keramickém materiálu [7]

3.1.2 Rovinné obvodové broušení

Při této metodě broušení dochází k vytváření rovinných ploch na obrobku obvodem brousícího kotouče. Klasifikace rovinného obvodového broušení je uvedena názorně na Obr. 3.10.

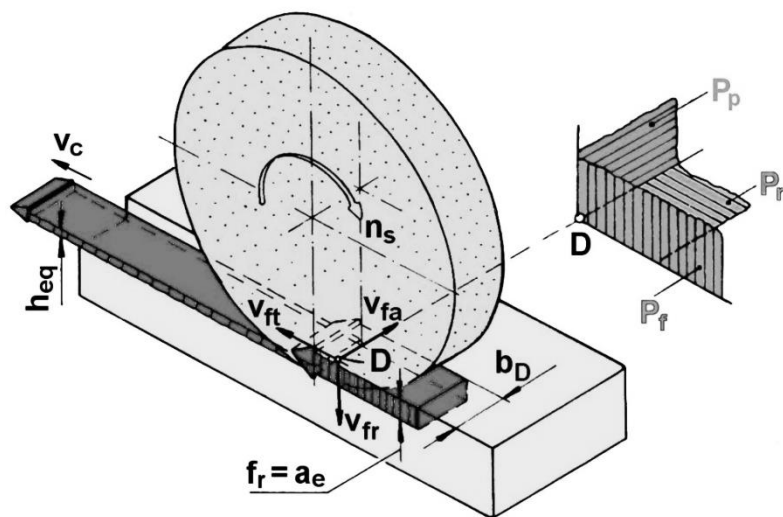


Obr. 3.10 Metody rovinného obvodového broušení [80]

Na Obr. 3.11 jsou uvedeny veličiny charakterizující rovinné obvodové broušení a jeho kinematiku. Řzná rychlost v_c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] při rovinném obvodovém broušení je vyjádřena následovně:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (3.9)$$

kde d_s je průměr brousícího kotouče [mm] a n_s je frekvence otáčení brousícího kotouče [min^{-1}].



Obr. 3.11 Kinematika rovinného obvodového broušení [81]

Stykový oblouk brousícího kotouče a obrobku lze kvantifikovat jako geometrickou délku styku l_g , kinematickou délku styku l_k nebo skutečnou délku styku l_e .

Pro běžné podmínky obvodového broušení je geometrická délka styku l_g [mm] dána vztahem [80; 81]

$$l_g = \sqrt{d_e \cdot a_e} \quad (3.10)$$

kde a_e je radiální posuv stolu brusky [mm], d_e je ekvivalent průměru brousicího kotouče [mm], viz vztah (3.13).

Kinematická délka styku l_k [mm] se vyjádří vztahem [81]

$$l_k = l_g \cdot \left(1 + \frac{1}{q}\right) \quad (3.11)$$

kde q je poměr rychlostí [-], který se pro rovinné broušení stanoví podle vztahu [81]

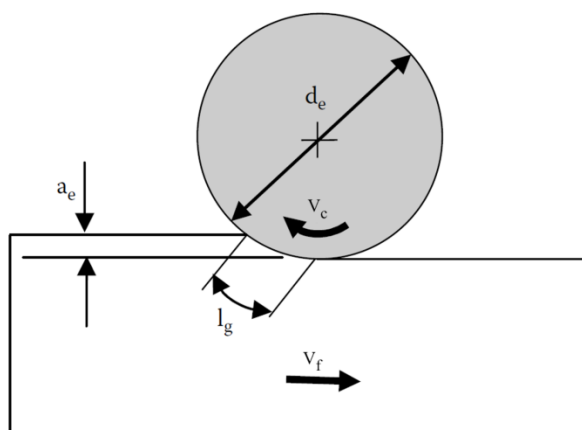
$$q = \frac{60 \cdot v_c}{w_{ft}} \quad (3.12)$$

kde v_c je řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], a w_{ft} je tangenciální rychlost posuvu stolu brusky [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$].

Ekvivalent průměru brousicího kotouče d_e [mm] je průměr fiktivního brousicího kotouče, který má v záběru s obrobkem stejnou délku geometrického styku l_g jako brousicí kotouč s průměrem d_s , v záběru s obrobkem o průměru d_w při obvodovém broušení. Hodnota d_e se vyjádří pomocí vztahu [80]:

$$d_e = \frac{d_w \cdot d_s}{d_w \pm d_s} \quad (3.13)$$

Ve vztahu (3.13) se pro vnější broušení do kulata použije znaménko plus a pro vnitřní broušení do kulata znaménko mínus.



Obr. 3.12 Schematické znázornění parametrů rovinného obvodového broušení [80]

Vzhledem k omezené platnosti a složitosti vztahů pro výpočet parametrů třísky ubírané jednotlivými zrny brousicího nástroje je pro výpočty při broušení využívána teoretická hodnota **ekvivalentní tloušťky broušení** h_{eq} . Při jejím odvození se vychází z kontinuity materiálu, který na jedné straně do oblasti řezání vstupuje a na druhé straně z ní vychází.

Vrstva odebíraného materiálu o tloušťce a_e (rovinné obvodové tangenciální broušení) vstupuje do oblasti řezání rychlostí v_{ft} . Množství vytvořených třísek pak lze teoreticky spojit v jedinou plynulou vrstvu o tloušťce h_{eq} , která odchází z řezné oblasti rychlostí v_c .

Teoretické rozborů i experimentální výzkum prokázaly, že pomocí hodnoty h_{eq} lze stanovit např. řezné síly a odpory, měrné řezné síly a odpory, měrnou práci, výkon a měrný výkon a tím s dostatečnou přesností charakterizovat proces broušení, i jeho výsledky z hlediska dosažených parametrů obrobené plochy (tvar, rozměry, drsnost povrchu).

Pro rovinné obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu se h_{eq} vyjádří pomocí vztahu [81]:

$$h_{eq} = a_e \cdot \frac{v_{ft}}{60 \cdot v_c} \quad (3.14)$$

kde a_e je pracovní (radiální) záběr [mm], v_c je řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], v_{ft} je tangenciální rychlost posuvu stolu brusky [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$].

Ekvivalentní tloušťka broušení je velmi užitečný parametr, ale nebere v úvahu vzdálenost jednotlivých zrn na povrchu brousícího kotouče. Komplexnějším parametrem je **maximální nedeformovaná tloušťka třísky h_m** , viz (3.7). Zde je ovšem složité vyjádření parametru r a pro broušení se používá hodnota 10-20. Také hodnotu C je obtížné stanovit. Je možné ji fyzicky změřit, ale v tom případě nejsou brány v úvahu trajektorie po sobě jdoucích řezných bodů pro aktuální podmínky broušení. Pro výpočet C také existuje řada relativně složitých matematických modelů. [80].

Konvenční rovinné obvodové broušení

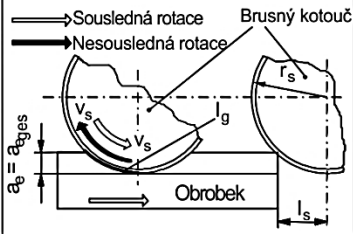
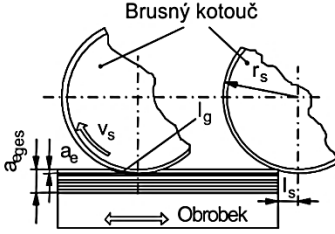
Jako konvenční je možné označit broušení obvodem kotouče, obvykle větších rovinných ploch, při němž je přídavek odebrán v malých krocích (nízké hodnoty hloubky řezu, doporučený rozsah obvykle 5-10 μm) za použití relativně vysokých posuvových rychlostí (4-16 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, u kovů je možné akceptovat hodnoty až 30 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$). Obrobek vykonává podélný vratný pohyb tangenciální posuvovou rychlostí v_{ft} („kyvadlový“ pohyb – v angličtině Reciprocating Grinding). V jedné nebo obou úvratích podélného zdvihu se stůl brusky (nebo brousící kotouč) posune příčně (axiálně) vzhledem k obrobku o hodnotu f_a a po obroušení celé plochy se pomocí radiálního posuvu kotouče (f_r) opakovaně nastaví hloubka broušení, až do odebrání celkového přídavku na broušení p (viz *Obr. 3.11*). Během broušení je řezná rychlost konstantní a směr rotace kotouče se nemění. V tomto případě je nevyhnutelné střídání sousledného a nesousledného broušení, což ovlivňuje velikost brousících sil, mazání a chlazení procesu a také opotřebení brousícího kotouče. Během tohoto způsobu broušení se vyskytuje značné množství neproduktivního času v důsledku pohybu kotouče a také pohybu stolu brusky naprázdno. Tento čas může být několikanásobkem času vlastního broušení (tedy doba skutečného kontaktu mezi kotoučem a obrobkem) [80; 81].

Hloubkové broušení

Hloubkové broušení (z anglického Creep Feed Grinding) je charakterizováno využitím

relativně *velké hloubky řezu* (více než 0,5 mm) a *velmi nízké posuvové rychlosti* (méně než $0,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$). Celkový přídavek na broušení je odebrán obvykle v jednom kroku. Pokud dokončujeme povrch v jednom kroku, je doba vlastního broušení prakticky rovna celkovému času obrábění a nedochází k prostojům jako v případě konvenčního broušení. V případě hloubkového broušení je možné si vybrat, jestli budeme obrábět sousledně, nebo nesousledně. Výběr závisí na ostatních řezných podmínkách.

Při obrábění kotouči s diamantovým abrazivem nebo kotouči z kubického nitridu boru je výška vyčnívajícího zrna abraziva rozdílná pro konvenční broušení a hloubkové broušení. Pokud je přísuv větší než výška zrna vyčnívajícího z pojiva, jedná se o hloubkové broušení. Při hloubkovém broušení je tloušťka třísky menší, proto i hodnoty řezné síly působící na jednotlivá zrna jsou nižší, než u konvenčního broušení a brusný kotouč není opakovaně namáhán, proto zrna brusiva drží v pojivu delší dobu. Na druhou stranu, při hloubkovém broušení je tepelné zatížení vyšší a také celková řezná síla je vyšší než při broušení konvenčním [80].

	Hloubkové broušení	Konvenční broušení
		
Hloubka řezu $a_g(\text{mm})$	0.5 – 30	0.001 – 0.05
Rychlost posuvu $v_R(\text{mm/s})$	0.1 – 40	100 – 500
Poměr rychlostí q (–)	3000 – 300 000	40 – 400
Geometrická délka styku $l_g(\text{mm})^*$	14 – 110	1.4 – 4.5
Počet pújezdů	Typicky 1	Funkce celkové hloubky řezu

* Poloměr brusného kotouče $r_s = 200 \text{ mm}$

Obr. 3.13 Porovnání konvenčního a hloubkového broušení [80]

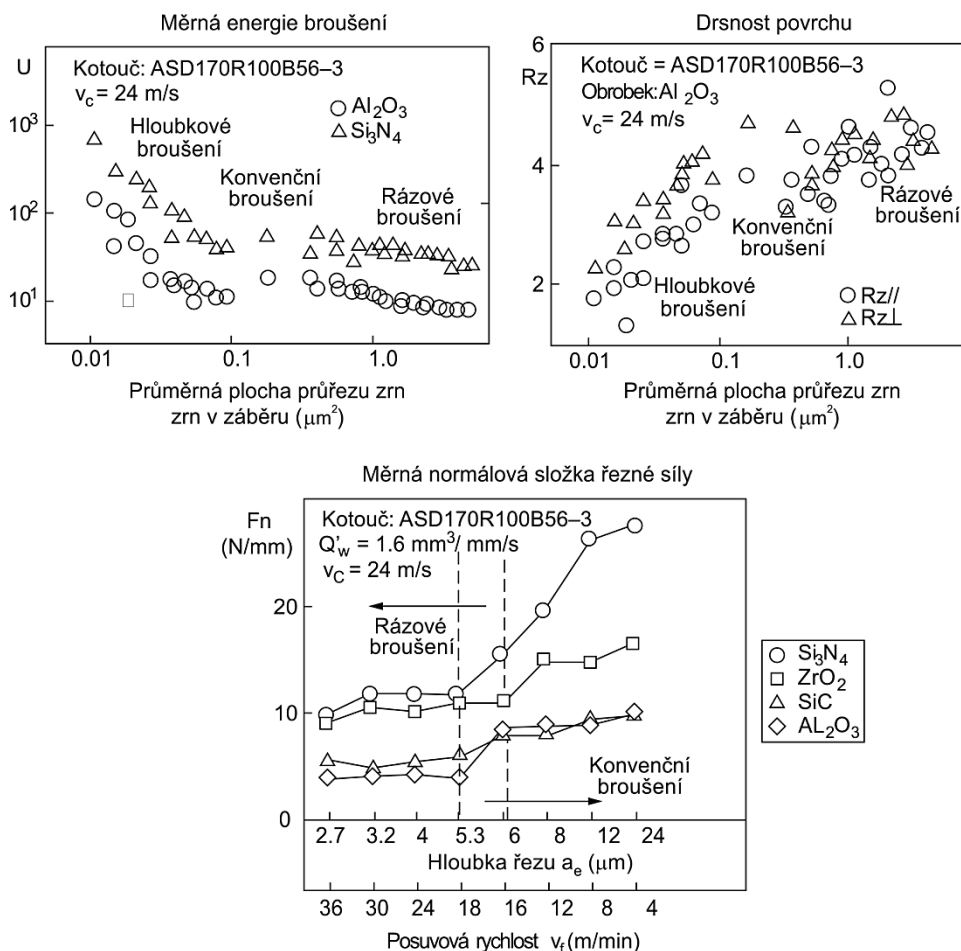
Hloubkové broušení je možné dále *zkombinovat se zvýšenou řeznou rychlostí a zvýšenou posuvovou rychlostí*. Výsledkem je vysoce výkonný způsob broušení. Z hlediska bezpečnosti broušení jsou používány řezné rychlosti kolem $125 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro brousící kotouče s pryskyřičným a skelným pojivem. V případě vyšších řezných rychlostí je vhodné používat kotouče s pojivem kovovým, případně kotouče ze supetrvrdých materiálů s kovovým tělem i pojivem. Výkonnostní broušení klade, z důvodu vyšších řezných sil, zvýšené požadavky na výrobní prostředky z hlediska konstrukce stroje, použití procesních kapalin, efektivní kontrolu procesu i úpravu brousících kotoučů a jejich orovnávání [8; 80; 81]. Tabulka Tab. 3.1 uvádí typické řezné podmínky pro konvenční, hloubkové a výkonnostní broušení.

Tab. 3.1 Řezné podmínky při různých metodách broušení [80]

Metoda broušení	Pracovní (radiální) záběr a_e [mm]	Řezná rychlost v_c [m/s]	Posuvová rychlost v_f [m/min]	Specifická rychlost úběru Q' [mm ³ /mm/s]
Konvenční broušení	0,001 - 0,05	1 - 30	20 - 60	0,1 - 10
Hlubkové broušení	0,1 - 30	0,05 - 0,5	20 - 60	0,1 - 15
Výkonnostní broušení	0,1 - 30	0,5 - 10	80 - 200	50 - 2000

Rázové broušení

Pod pojmem „rázové“ broušení (z anglického Speed-Stroke Grinding) rozumíme metodu broušení, při níž jsou použity velmi vysoké rychlosti posuvu ($50 - 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) a velmi malá hloubka řezu ($1 \mu\text{m}$ a méně). Metoda byla vyvinuta zejména za účelem dosažení vysokých úběrů materiálu při broušení pokročilé keramiky, při současném zachování hloubky řezu v režimu tvárného úběru materiálu.



Obr. 3.14 Charakteristiky procesu při různých metodách broušení [80]

Při zachování konstantního úběru se zvětšuje tloušťka třísky se zvyšující se posuvovou rychlostí. Specifická energie broušení se snižuje a stejně tak klesají hodnoty hloubky řezu. Také se snižuje teplota povrchu obrobku. Naproti tomu se zvyšují hodnoty drsnosti povrchu a také řezná síla působící na jednotlivá zrna brusiva (viz *Obr. 3.14*). Rázové broušení tedy nabízí možnost velmi rychlého úběru materiálu s nižšími silami a nižším rizikem opalu, ale drsnost povrchu bude vyšší. Zlepšení drsnosti povrchu je provedeno pomocí úpravy technologie broušení, to znamená snížení posuvové rychlosti při dokončovacím broušení.

Proces rázového broušení klade zvýšené nároky na konstrukci brusek, protože stroje musí být schopny kontrolovat zrychlování a zpomalování posuvu bez nadměrných vibrací, a také aby přejezdy kotouče v úvratích příliš nepřekročily rozměr obrobku (mohlo by dojít k neúměrnému nárůstu času broušení a tím by byla potlačena hlavní výhoda tohoto procesu) [8; 80].

3.1.3 Řezná síla při broušení

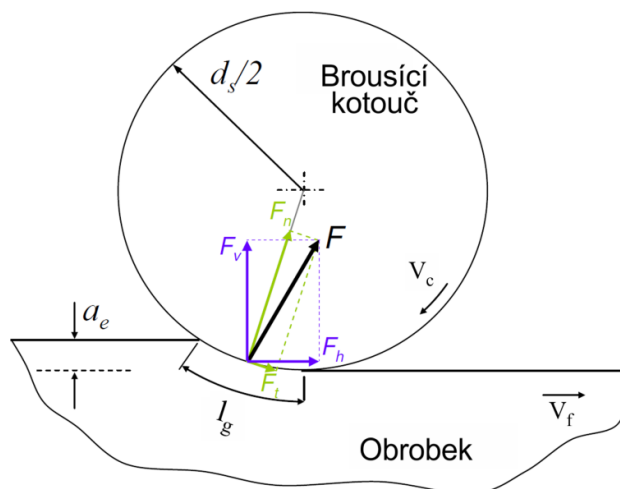
Řezná síla představuje klíčový prvek procesu broušení ovlivňující rychlost úběru materiálu, kvalitu obrobeného povrchu, teplotu a vibrace při broušení a také opotřebení a životnost brousícího kotouče. Brousící síly jsou také důležitým parametrem, který lze využít při optimalizaci řezných podmínek a konstrukci brusek a upínacích přípravků. Z těchto důvodů bylo vždy věnováno mnoho úsilí pochopení působení řezných sil při broušení. Jedná se ovšem o relativně náročný úkol, protože topografie brousícího kotouče má náhodný charakter a samotný proces broušení je velmi komplikovaný, zahrnující složité interakce různých proměnných [72; 82].

Vzhledem k tomu, že řezná síla (a také výkon) jsou důležitými faktory pro optimalizaci, monitorování i kontrolu procesu broušení, je zásadní tyto parametry předvídat. Ovšem řezná síla i výkon jsou ovlivněny mnoha faktory a jejich experimentální určení je pracné, časové náročné a výsledky určené na základě daných experimentálních podmínek většinou není možné využít obecně. Na druhou stranu jsou empiricky získané vztahy pro určení řezné síly považovány za praktické a snadno použitelné zejména v průmyslu [72].

Velké úsilí je věnováno stanovení modelu pro spolehlivou predikci řezné síly a výkonu. Pro broušení keramiky je to stále jedním z klíčových úkolů. Zde je třeba vzít v úvahu rozdíly mezi broušením keramik a broušením kovů. Proto modely a simulace stanovené pro kovy nemohou být pro keramické materiály zcela využity [8; 83].

Řezná síla se z praktických důvodů rozkládá do několika směrů. Rozklad řezné síly na jednotlivé složky při obvodovém rovinném broušení je uveden na *Obr. 3.15*. Řezná síla při broušení se rozkládá na normálovou složku (radiální) a tangenciální složku, nebo také na složky horizontální a vertikální. Tangenciální složka působí tangenciálně v místě kontaktu kotouče a obrobku, to znamená ve směru řezné rychlosti. Normálová složka působí kolmo k povrchu kontaktu kotouče a obrobku. Vzhledem k tomu, že průměr brousícího kotouče d_s je významně větší, než hloubka řezu a_e , lze předpokládat, že tangenciální a normálová složka řezné síly je totožná s horizontální a vertikální složkou. Tuto aproximaci není

možné využít při metodách s velkou hloubkou záběru (typicky při hloubkovém broušení [73; 84].



Obr. 3.15 Rozklad řezné síly na jednotlivé složky [84]

Tangenciální složku řezné síly F_t [N] je možné vypočítat ze vztahu [80]:

$$F_t = \frac{P}{v_c} = \frac{e_c \cdot Q' \cdot b_w}{v_c} \quad (3.15)$$

kde P je výkon broušení, v_c je řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], e_c je měrná energie broušení [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$], Q' je měrná rychlost úběru [$\text{mm}^3/\text{mm/s}$] a b_w je šířka broušení [mm].

Normálová složka řezné síly F_n [N] je vztažena k tangenciální složce F_t pomocí koeficientu broušení μ . Jedná se o **poměr složek řezné síly** a je definován podobným způsobem jako koeficient tření [80].

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} = \frac{F_{t'}}{F_{n'}} \quad (3.16)$$

Hodnota μ se pohybuje v nízkých hodnotách kolem 0,2 pro obrábění s nízkým úběrem, pro kalené oceli a keramiku, až po hodnoty kolem 0,8 pro broušení s vysokým úběrem a broušení měkkých ocelí nebo šedé litiny. Na hodnotu má vliv také chlazení v důsledku hydrodynamického tlaku, který je způsoben vysokými otáčkami. Vzhledem k tomu, že tangenciální složku je možné vypočítat z výkonu a nikoliv z normálové složky, znalost μ je užitečná pro stanovení požadované tuhosti systému a požadavků na upínání nástroje i obrobku [80].

Ve vztahu (3.16) jsou složky řezné síly $F_{n'}$ a $F_{t'}$ [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$] redukovány na jednotku šířky broušení b a jsou označovány jako **měrné složky řezné síly**. Typicky jsou tyto hodnoty vztaženy na 1 mm šířky broušení.

Tangenciální složka řezné síly je rozhodující při určení **výkonu broušení P** , viz vztah (3.15) a úzce souvisí s kinematikou řezného procesu a normálová složka má význam pro přesnost a vysokou kvalitu povrchu a posuzování vlivu obráběného materiálu.

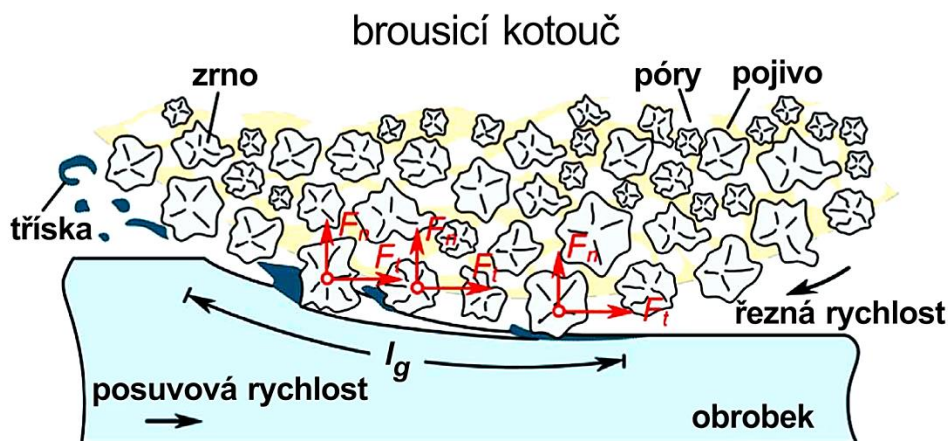
Při posouzení procesu broušení z hlediska efektivity a tepelného zatížení je významná hodnota **měrná energie broušení** e_s [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$], tedy energie na jednotku objemu odebraného materiálu [80]:

$$e_s = \frac{F_t \cdot v_c}{a_e \cdot v_{ft}} \quad (3.17)$$

Kde F_t je tangenciální složka řezné síly [N], v_c je řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], v_{ft} je tangenciální rychlost posuvu stolu brusky [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] a a_e je radiální posuv stolu brusky [mm],

Měrná energie broušení je obráceným měřítkem efektivity broušení. Proto je trendem monitorování e_s za účelem sledování „kondice“ brousícího procesu. Například, pokud e_s roste s časem, indikuje to potřebu orovnění brousícího kotouče. Měrnou energii broušení je možné výhodně vypočítat z naměřených řezných sil, případně výkonu broušení.

Upevnění zrna v pojivu brousícího kotouče přímo souvisí se **silami působícími na jednotlivá zrna brusiva**, viz *Obr. 3.16*. Hodnota síly působící na jedno zrna brusiva se zvyšuje s nedeformovanou tloušťkou třísky h_m . Je zřejmé, že při konstantním úběru jsou síly nižší při velké hloubce řezu a nízké rychlosti posuvu. Míra upevnění zrn brusiva může být nižší pro hloubkové broušení a vyšší pro konvenční broušení. Nižší míra upevnění brusiva vede k lepší samoostřicí schopnosti a dochází k redukci řezných sil. Hodnoty sil působících na jednotlivá zrna brusiva se zvyšují se zvětšujícím se opotřebením brousícího kotouče [80].



Obr. 3.16 Úběr materiálu v zóně broušení se schematickým vyznačením složek řezné síly působící na jednotlivá zrna brusiva [72]

Řezná síla při hloubkovém broušení

Vzhledem k delší dráze kontaktu kotouče s obrobkem a vysoké hodnotě hloubky řezu při hloubkovém broušení je celková řezná síla obvykle vysoká v porovnání s konvenčním broušením. To také znamená vysoké tepelné zatížení v zóně broušení, které ovlivňuje jak brousící kotouč, tak stroj samotný, ale ohrožuje také povrch obrobku vznikem trhlin a

strukturních změn. Vysoké broušící síly negativně ovlivňují statické i dynamické namáhání stroje, a tím také přesnost obrobků. Proto proces hloubkového broušení klade vysoké požadavky na tuhost a výkon brusek. Broušící síly mohou být sníženy minimalizací sil působících při broušení na jednotlivá zrna brusiva. To je možné realizovat zvýšením řezné rychlosti, protože dojde ke snížení tloušťky třísky a sníží se počet broušících zrn v záběru.

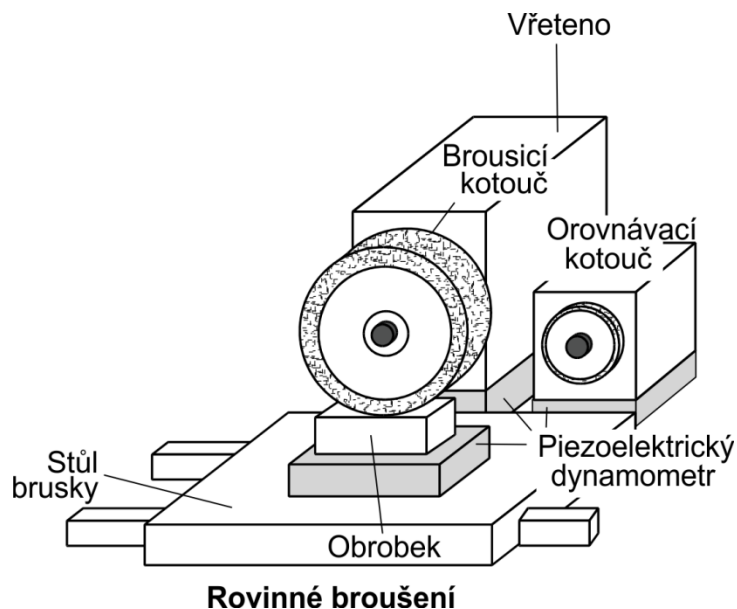
Zvýšení hloubky řezu nebo posuvové rychlosti znamená zvýšení tloušťky třísky, a tím také zvýšení hodnoty řezné síly [8; 80].

Řezná síla při rázovém broušení

Při rázovém broušení je celková řezná síla nižší, než u konvenčního a hloubkového broušení. Je to způsobeno vyšší intenzitou samoostření broušícího kotouče a vysokou hodnotou příčného průřezu účinných ostří. Znamená to, že síly působící na jednotlivá zrna brusiva vzrůstají a je třeba provést opatření v podobě důsledného výběru typu broušícího kotouče. Konkrétně se jedná o vysokou míru upevnění zrn brusiva v pojivu. Opatření broušícího kotouče během rázového broušení je silně ovlivněno výběrem pojiva (konkrétně při broušení keramiky Al_2O_3). Kotouče s pryskyřičným pojivem vykazovalo nízké opotřebení, zatímco kotouče s kovovým a skelným pojivem se opotřebovávaly extrémně [8; 80].

Měření řezné síly

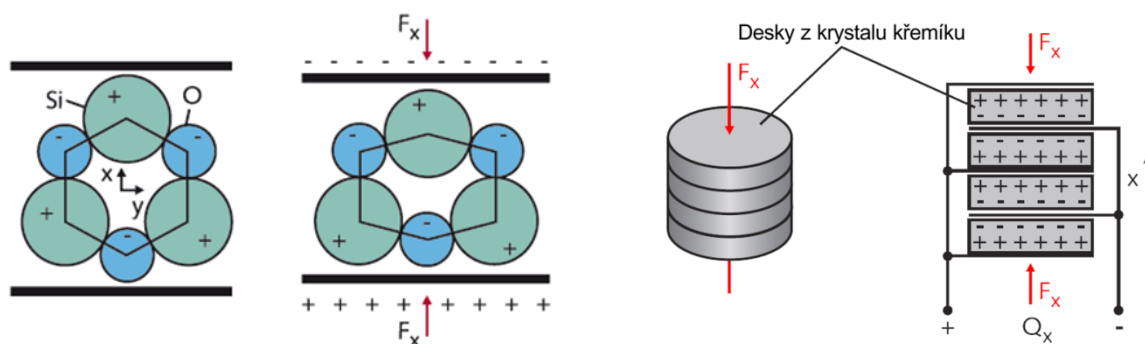
K měření sil při procesu broušení se v současnosti nejčastěji využívá piezoelektrických dynamometrů. Při rovinném broušení se aparatura dynamometru nejčastěji montuje na stůl brusky tak, aby nesla obrobek. Na Obr. 3.17 jsou označena místa na stroji, kam se umisťují dynamometry.



Obr. 3.17 Rozmístění dynamometrů při procesu rovinného broušení [80]

Piezoelektrický dynamometr využívá piezoelektrického efektu, který se projevuje u piezoelektrických materiálů, například monokrystalického křemenu. Při působení

mechanického zatížení na jejich vnější povrch je generováno elektrické napětí. Kladné a záporné elektrické náboje jsou generovány, protože ionty opačných nábojů se vlivem deformace vzájemně posunou v krystalové mřížce. V jistých polohách krystalu vznikne elektrický dipól. Takto vzniklý elektrický náboj je přímo úměrný vnější síle působící na krystal. Většina piezoelektrických snímačů síly (dynamometrů) využívá jako měřicí elementy krystalové disky. Disky jsou z krystalu vyřezány podle toho, zda jsou určeny pro snímání tlakového nebo smykového napětí. Následně jsou poskládány nad sebe a umístěny mezi základní a krycí desku zařízení. Dynamometr je založen na čtyřech 3-složkových snímačích a může zaznamenat tři složky síly najednou. Na základě změřených hodnot síly a známé geometrické polohy snímačů je také možné dopočítat příslušné krouticí momenty [85; 86].



a) Vznik náboje deformací krystalu křemíku

b) Schéma tříložkového dynamometru

Obr. 3.18 Princip piezoelektrických dynamometrů [85]

3.1.4 Broušící nástroje

Při obrábění keramických materiálů jsou kladeny vysoké požadavky na obráběcí nástroje. Až na výjimky, pouze diamantové broušící nástroje zajišťují stabilní a cenově přijatelné obrábění pokročilé keramiky. Diamantová broušící zrna jsou v brusné vrstvě zakotvena vhodným pojivem. Tloušťka brusné vrstvy tvořené diamantovým abrazivem a pojivem je obvykle jen několik milimetrů a je nanесena na broušícím kotouči různých tvarů. Vlastnosti abrazivního materiálu i pojiva mají zásadní vliv na proces broušení. Opravy broušících kotoučů, jako ostření, tvarování nebo orovnávaní zajišťují požadovanou topografii aktivní brusné vrstvy. Vysoká tvrdost diamantového abraziva klade na orovnávaní broušících kotoučů specifické požadavky. Proces broušení tedy neoddelitelně sestává ze dvou částí – procesu přípravy kotouče a broušení samotného.

Diamant jako abrazivum

Diamant je nejtvrdší známý materiál. Vyskytuje se v přírodě, ve své přirozené formě a pro průmyslové potřeby je připravován synteticky, stlačováním grafitu za vysokých tlaků a teplot. Diamant může být využíván v aplikacích, kde pracovní teplota nepřesáhne 700 °C.

Vzhledem k tomu, že se při výrobě používají materiály s různými vstupními vlastnostmi a parametry procesu výroby se také liší, jsou v praxi vyráběna diamantová abraziva

s různými vlastnostmi (tvrdost, pevnost, struktura zrn). Diamantová zrna jsou charakterizována vysokou tepelnou vodivostí, což je jedním z důvodů, proč jsou využívána jako abrazivní materiál pro broušení keramických materiálů. Diamantová zrna jsou vyráběna v různých zrnitostech. Klasifikace zrnitosti se provádí proséváním abraziva přes definovaná síta. Průměrná velikost zrn se pohybuje řádově v mikrometrech.

Diamantová brousící zrna podléhají během broušení keramiky značnému mechanickému a tepelnému namáhání, v jehož důsledku dochází k různým typům opotřebení zrn. Jedná se o mechanické procesy, jako abrazivní otěr, mikrolomy částí zrn, nebo vylamování celých zrn z pojiva a dále dochází mezi obrobkem, chladicí kapalinou a zrny k chemickým procesům.

Pojivo

Pojivo slouží k fixaci brousících zrn. Optimální pojivo by mělo zabezpečit řádnou fixaci ostrých zrn brusiva a zároveň umožnit uvolňování zrn, která jsou již opotřebená. Pro každou brousící operaci je nutné volit takovou kombinaci brusivo-pojivo, abychom se co nejvíce přiblížili tomuto ideálnímu stavu. Pojivo musí dále zabezpečit odolnost proti abrazivnímu opotřebení, které bývá způsobeno keramickými třískami a uvolněnými diamantovými zrny. Vlastnosti pojiva (například odolnost proti uvolňování zrn, tepelná vodivost) určují chování brousícího kotouče během broušení.

Pojiva jsou typicky pryskyřičná, kovová a skelná. Pro obrábění keramických materiálů jsou nejčastěji využívána pojiva pryskyřičná a kovová.

Pro kovová pojiva jsou obvykle používány kombinace měď/cín a kobalt/bronz (ve speciálních případech ocel/měď/cín). Hlavním znakem kovových pojiv je, že pevně přilnou k diamantovým zrnům a poskytují vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Na druhou stranu je vždy nutné kotouče s kovovým pojivem po obrábění keramiky ostřit. Diamantová brousící vrstva s kovovým pojivem je vyráběna slinováním za vysokých teplot, proto diamantová zrna musí mít vysokou tepelnou odolnost, aby při výrobě kotouče nedošlo k jejich poškození.

Pryskyřičná pojiva jsou vyráběna hlavně z fenolové pryskyřice a je možné do něj přidávat přísady, které mění výsledné vlastnosti pojiva. Pryskyřičné pojivo je nejčastěji používáno s pokovenými diamantovými zrny za účelem vylepšení mechanického ukotvení zrn v pojivu. Odolnost proti abrazivnímu opotřebení je nižší, než s použitím kovového pojiva.

Tělo kotouče

Diamantový brousící kotouč je tvořen buď jednou monolitní vrstvou pojivo-brusivo, nebo, mnohem častěji, je vyrobeno kovové těleso kotouče a na něj je nanášena vlastní funkční vrstva s tloušťkou většinou několik milimetrů. Monolitní diamantové kotouče není možné orovnávat. V tomto smyslu jsou tedy „vícevrstvé“ kotouče mnohem flexibilnější. V praxi existuje celá řada kombinací těleso-funkční brousící vrstva.

Při obrábění keramiky je z důvodu křehkosti těchto materiálů, zásadní minimalizovat vibrace. Brousící kotouč musí být tedy optimalizován tak, aby nedošlo k nevývaze

kotouče, nebo chybám při upínání. Vibrace způsobené těmito nedostatky mohou být ovlivněny hmotností kotouče, proto je snahou tuto hmotnost snižovat. Zde je s výhodou využíváno těleso z pryskyřičného kompozitu, protože má nízkou hmotnost, vysokou tlumící schopnost, střední pevnost a tepelnou vodivost.

Vyvažování brousicích kotoučů

Jedním z hlavních zdrojů vynuceného kmitání při broušení může být *nevyváženost brousicího kotouče*. Nevyváženost nastane, pokud se těžiště rotující soustavy nenachází v geometrickém středu otáčení. Vibrace způsobené nevyvážeností brousicího kotouče mohou způsobit trhliny na povrchu křehkého keramického materiálu a také zkrátit životnost ložisek ve vřetenu stroje. Nároky na eliminaci vibrací při broušení keramiky jsou vysoké, proto je třeba kotouče pečlivě *vyvažovat*. Vyvažování spočívá v uspořádání hmoty tak, aby se těžiště rotujícího nástroje, příruby a vřetena shodovalo s geometrickým středem této soustavy, případně s osou otáčení rotujících částí.

K vyvažování kotoučů je využívá metoda statická, na vyvažovacím stojánku, nebo metoda dynamická, která je v případě vysokých požadavků na broušení tvrdé keramiky, zásadní. Přesné dynamické vyvažovačky jsou zabudovány přímo na brusky a používají se za chodu stroje, při pracovních otáčkách kotouče. Na základě zabudovaných senzorů (obvykle akcelerometrů poblíž ložisek ve vřeteni) je stanovena hodnota nevyvážení a následně je provedeno vyvážení pomocí tangenciálních nebo radiálních nastavitelných závaží. Alternativní možností je využití komor ve vřeteni stroje, které jsou plněny tekutinou, dokud není kouč vyvážen. Proces vyvážení je možné opakovat vždy po procesu broušení [7; 9].

Orovnávání diamantových brousicích kotoučů

Proces orovnávaní diamantových brousicích kotoučů je jiný, než se používá pro konvenční brousicí kotouče. U konvenčních kotoučů jsou obvykle tvarování a ostření jeden proces. Diamantové kotouče jsou připravovány ve dvou krocích – úprava tvaru a geometrie kotouče a ostření kotouče.

Tvarování kotouče je proces, při kterém obnovujeme správnou geometrii a tvar kotouče. Tvarování je možné provést dvěma metodami. Volba metody závisí hlavně na typu brousicího kotouče. První metoda využívá k tvarování nediamantového brousicího kotouče (například z SiC) namontovaného na orovnávací zařízení. Této způsob se využívá zejména pro tvarování kotoučů s kovovým a pryskyřičným pojivem, protože je jednoduchý na ovládání. Při tomto procesu je nutná dostatečná tuhost kotouče a orovnávacího zařízení, aby hodnota normálové síly k odebrání pojiva i diamantového brusiva byla co největší. Během tvarování je z orovnávaného kotouče odebráno velmi malé množství materiálu v porovnání s tvarovacím kotoučem.

Druhým způsobem tvarování jsou rotační diamantové tvarovače. Za účelem snížení opotřebení tvarovače je nutné minimalizovat stykovou oblast. Výhodou tohoto způsobu je krátký proces tvarování. Definovaný úběr na brousicím kotouči umožňuje automatizaci. Za použití tvarovacího disku je možné tvarovat různé tvary kotoučů.

Použití klasických diamantových tvarovačů není pro diamantové kotouče vhodné, protože dochází k jejich vysokému opotřebení.

Po tvarování diamantového kotouče následuje ostření. Cílem ostření je odstranění pojiva mezi zrna na obvodu kotouče tak, aby zrna opět vyčnívala (po tvarování je povrch kotouče hladký) a vytvořit v brousicí vrstvě dostatečnou mezeru pro třísky. Nejdůležitější metody ostření jsou abrazivní a elektrické, podle způsobu odebrání materiálu.

Abrazivní metody jsou používány hlavně pro ostření kotoučů s pryskyřičným a skelným pojivem a dělíme je podle druhu nástroje na ostření vázaným abrazivem nebo volným abrazivem. Metoda ostření vázaným abrazivem (blok) je více frekventovaná, protože je jednoduchá na použití. Velkou nevýhodou všech abrazivních metod je, že abrazivum neodebírá pouze pojivo v kotouči, ale také zatěžuje diamantová zrna a může způsobit jejich lom, nebo vypadnutí z pojiva.

Elektrické metody používané pro kotouče s kovovým pojivem neovlivňují během procesu ostření diamantová zrna. Během elektrolytického orovnávacího procesu brousí kotouč a jeho funkční vrstva prochází nádrží naplněnou kapalinou. Kovové pojivo v kotouči tvoří jednu elektrodu (anodu), nádrž druhou elektrodu (katodu) a kapalina v nádrži slouží jako elektrolyt. Úběr pojiva během procesu probíhá bez jakéhokoli ovlivnění nevodivého brusiva. Elektrolytické orovnávací je běžně používáno jako metoda orovnávací kotouče přímo při procesu broušení a je charakteristická nízkým úběrem pojiva. Používá se pro kotouče s nízkou zrnitostí.

Druhý typ elektrického způsobu orovnávací je založen na elektrické erozi. Mezi brousícím kotoučem a orovnávacím nástrojem, který je dvoupólová elektroda, dojde ke kontaktu. Třísky vznikající z elektrody redukuje existující vzduchovou mezeru mezi pojivem a elektrodou. Ve chvíli, kdy je tato mezera dostatečně malá, dojde k elektrickému výboji, který způsobí úběr materiálu pojiva [7; 9].

3.1.5 Brousicí stroje – brusky

Charakteristická citlivost keramických materiálů na tlakové namáhání a bodové zatížení vyžaduje jiný přístup při obrábění keramických součástí, než je tomu u tvárných materiálů. Kvůli typické topografii funkční vrstvy brousicího kotouče je silový poměr (normálová síla k tangenciální síle) jiný než jak ho známe z operací jako soustružení nebo frézování. Při broušení keramiky může být tento poměr 1:5, nebo i méně, v závislosti na vlastnostech obráběného materiálu. Proto brusky pro obrábění keramických materiálů musí mít vysokou tuhost.

Vysoké požadavky na rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu musí být zohledněny již při návrhu a instalaci strojů určených pro obrábění keramických dílů. V současnosti jsou však pro broušení keramiky často používány brusky navrhované pro opracování kovových materiálů. Konvenční brousicí stroje je nutné pro potřeby obrábění keramiky adaptovat.

Za účelem dosažení kvalitních keramických dílů je nutné při broušení keramiky ovládat statické i dynamické zatěžování stroje. Z důvodu vysoké hodnoty řezných sil při broušení, je nutná vysoká statická tuhost stroje, která zaručí vysokou rozměrovou i tvarovou přesnost

dílů. Odolnost proti dynamickému namáhání zahrnuje, mimo jiné, i eliminaci chvění (vibrací) v systému stroje. Statické a dynamické chování je určeno především vlastní konstrukcí a vřetenem stroje.

Při broušení keramických materiálů je také zásadní chránit vodítka stroje před třískami, které při broušení vznikají (vhodné krytování). Jedna se fakticky o abrazivní prach, který by po vniknutí do vedení, velmi rychle způsobil jeho opotřebení.

Za účelem redukce mechanického, tepelného a chemického namáhání v zóně broušení jsou při procesu používány procesní kapaliny. Hlavními funkcemi procesních kapalin je chlazení a mazání a také čistí zónu broušení, brousící kotouč i součásti obráběcího stroje od třísek a částic vylomených z brousícího nástroje. Použitím procesních kapalin dochází ke snížení opotřebení nástroje. Při obrábění keramického materiálu hraje zásadní roli také filtrace, protože abrazivní keramické třísky mohou mít rozměr pod 1 μm .

Vzhledem k vlastnostem keramických materiálů je, při jejím obrábění, třeba pečlivě zvážit také systém upínání. Hlavním kritériem volby upínání je vyhnout se lokálnímu zatížení obrobku, které by mohlo způsobit jeho poškození v důsledku lomu. Vzhledem k vysokým brousícím silám, je nutné dosáhnout i vysokých upínacích sil.

Součástí strojů pro broušení keramiky by také měly být rozsáhlé monitorovací systémy jako například snímače sil, snímače vibrací a senzory akustické emise, které v kombinaci s CNC řízením umožní kompenzovat opotřebení nástroje a odchylky vřetena. Součástí stroje by měl být také systém pro ovrhávání kotouče během procesu broušení, viz kapitola 2.2.1 a 3.1.3 [7; 9].

3.2 Vibrační analýza

Žádný stroj nelze vyrobit tak, aby za provozu nebyl doprovázen vibracemi. Tyto mechanické kmity jsou pro každý stroj charakteristickou veličinou a odráží jeho vnitřní vazby a stavy a také spojení s okolím. Vibrační diagnostika je jednou z hlavních metod bezdemontážní nedestruktivní diagnostiky a využívá vibrace, jako zdroj informací pro stanovení technického a provozního stavu strojních zařízení.

Mezi obvyklé zdroje vibrací patří především nevyváženost rotujících částí, nesouosost, ohnutý hřídel, mechanické uvolnění, ozubená soukolí, řemenové převody, řetězové převody, kluzná a valivá ložiska, elektromotory, rezonance [87].

Hlavním cílem vibrodiagnostiky je odhalit skutečný stav zařízení a tím umožnit operativní plánování údržby, minimalizovat zbytečné preventivní opravy a předcházet havarijním odstávkám [88; 89].

Vibrační diagnostika bývá také velmi často využívána k ladění řezných podmínek (technologických podmínek při obrábění) a k odstranění některých nežádoucích jevů, které se mohou při procesu obrábění vyskytnout. Mezi takové jevy můžeme zařadit mimo jiné i *zhoršenou kvalitu povrchu* (zhoršená drsnost povrchu, vznik vlnitosti) *v důsledku přítomnosti vibrací v technologickém systému*. Nápravy lze dosáhnout diagnostikou vibrací a vhodným zásahem na straně výrobního stroje a technologie výroby. Vlnitost povrchu může mít několik podob:

- „vizuální závada“, tj. geometrie i drsnost povrchu jsou v pořádku, ale na obrobku pozorujeme mělké, periodicky se opakující „vlny“,
- pravidelná vlnitost většího charakteru, která se již projevuje zhoršenou drsností povrchu, ale stále se jedná o stabilní děj, tzn. děj je opakovatelný, vlnitost se v čase nezvětšuje, případně se utlumuje,
- třetí typ je způsoben takzvaným samobuzeným kmitáním při obrábění; hovoříme o nestabilním řezném procesu, kdy je struktura stroje nadměrně buzena samotným řezným procesem natolik, že opracovaný povrch je velmi hrubě obroben; objevuje se zde tzv. regenerativní efekt postupného rozkmitávání nástroje a struktury obráběcího stroje, které může vést až k destrukci nástroje, poškození obrobku a podobně.

Zdroje vibrací se projeví ve vibračním spektru nebo v časovém záznamu vibrací (tedy i vlnitostí povrchu obrobku) jiným způsobem. Proto je vibrační diagnostika obráběcích strojů (a případně řezného procesu) výrazným pomocníkem při **řešení problematického povrchu obrobku** [90].

3.2.1 Kmitání

Dynamické namáhání stroje ovlivňuje jak přesnost výrobků, tak produktivitu a je charakterizováno **kmitáním** (vibracemi). Obecně je kmitání dynamický jev, při němž hmotné body nebo tuhá tělesa vykonávají vratný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy.

Rovnovážná poloha tělesa je podmíněná nulovou hodnotou působících sil a naopak kmitání tělesa je vždy způsobeno budící silou, která může být vnější nebo vnitřní.

Vibrace je možné také chápat jako odezvu hmoty na působící sílu. Pružně uložené těleso o hmotnosti m a tuhosti uložení k je působením síly vychýleno ze své rovnovážné polohy a vykonává kmitavý pohyb. Zanedbáme-li tlumení, bude hmota kmitat vlastní frekvencí

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.18)$$

kde ω je vlastní kruhová frekvence [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$].

V technické praxi se však častěji užívá frekvence f [Hz], která odpovídá počtu celých cyklů za sekundu, vyjádřená v Hertzích:

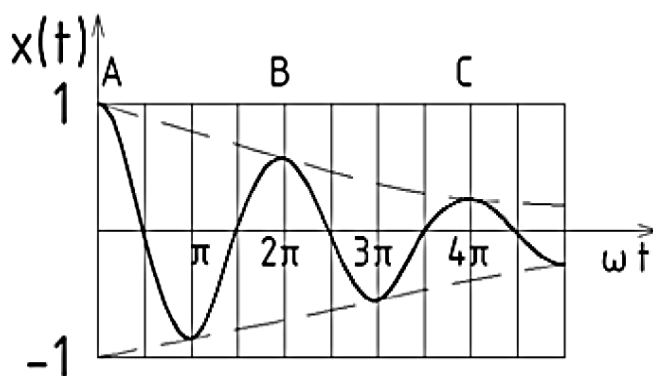
$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.19)$$

nebo periodou T [s], která je vyjádřena obrácenou hodnotou frekvence f :

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\omega \quad (3.20)$$

Kmitání jednotlivých prvků technologického systému (stroj-nástroj-obrobek-upínač) je úzce svázáno se zhoršením kvality obrobenej plochy (vznik vlnitosti, zhoršená drsnost povrchu), zvýšením intenzity opotřebení nástroje (může způsobit vylamování břitu, nebo i celkovou destrukci nástroje), urychlením opotřebení součástí obráběcího stroje a zhoršením pracovního prostředí (vysoké tóny nebo silný hluk). Rozlišujeme kmitání *vlastní, vynucené a samobuzené* [7; 88; 91].

Vlastní kmitání některé části nebo několika částí technologické soustavy je určeno vlastní frekvencí. Takové kmitání může být vyvoláno rázem, například záběrem nástroje nebo sepnutím spojky. Vlastní kmity se udržují působením pružných sil, vlivem odporů se utlumí (viz *Obr. 3.19*), a proto lze jejich vliv obvykle zanedbat [92; 91].



Obr. 3.19 Časový průběh vlastních kmitů [88]

Vynucené kmitání vznikne, působí-li na soustavu periodicky proměnlivá budicí síla a jeho charakteristickým znakem je, že frekvence kmitání se obvykle shoduje s frekvencí této síly. Pohybovou rovnici vynuceného kmitání pak lze uvést ve tvaru:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F(t) \quad (3.21)$$

kde $F(t)$ značí periodicky proměnlivou budicí sílu.

Fyzikální model translační kmitové soustavy vynuceně kmitají o jednom stupni volnosti s tlumením a časový průběh vynuceného kmitání je znázorněn na *Obr. 3.20*.

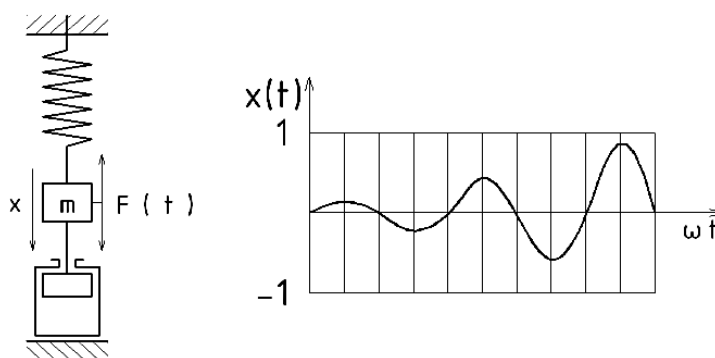
Při bezprostředním působení rušivé síly kosinusového průběhu pravou stranu pohybové rovnice píšeme ve tvaru:

$$F(t) = F_0 \cos \omega t \quad (3.22)$$

kde F_0 je maximální velikost síly F , tj. její amplituda a ω je kruhová frekvence síly F .

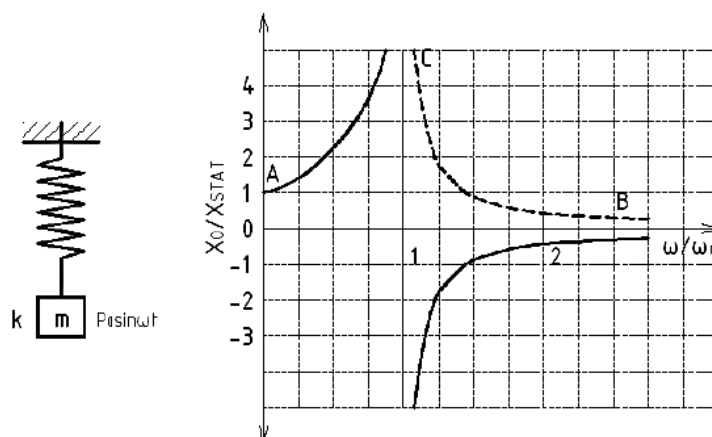
V komplexní formě vyjádříme pravou stranu pohybové rovnice:

$$F(t) = F e^{i\omega t} \quad (3.23)$$



Obr. 3.20 Fyzikální model a časový průběh vynuceného kmitání [88]

Klidné těleso, na které začne působit budicí síla, se rozkmitá (*Obr. 3.20*) a amplituda kmitání se ustálí na určité hodnotě, úměrné amplitudě budicí síly. Při konstantní hodnotě frekvence vlastních kmitů f se mění amplituda vynucených kmitů, mění-li se frekvence budicí síly. Při rezonanci, kdy frekvence budicí síly je rovna frekvenci vlastních kmitů, je teoreticky amplituda vynucených kmitů nekonečně velká (rezonanční jev), je-li soustava bez tlumení (*Obr. 3.21*). Jelikož každá kmitající soustava má tlumení, bude mít rezonanční amplituda konečnou hodnotu. Budicí síla nemusí mít kosinusový nebo sinusový průběh, aby vyvolala periodické kmitání, ale musí mít periodický charakter.



Obr. 3.21 Rezonanční jev [88]

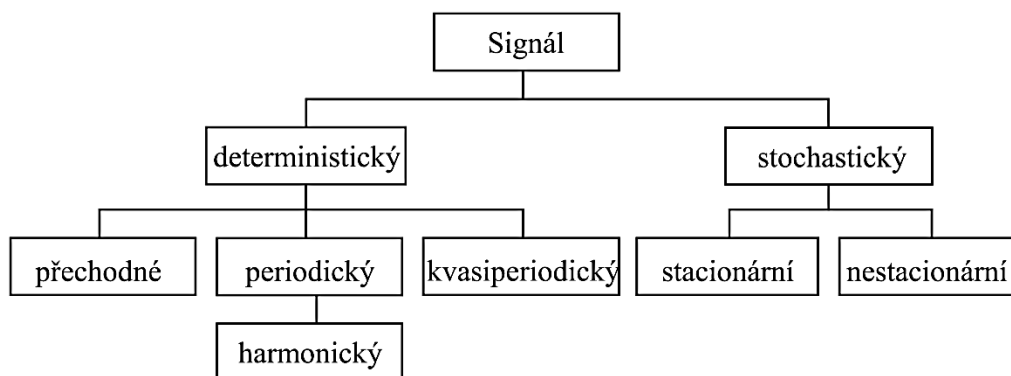
Vynucené kmitání je generováno například:

- nevyvážením rotujících částí,
- přímočarými vratnými pohyby obrobku, nástroje, částí stroje,
- působením periodických sil během procesu broušení (oddělování třísky, periodické házení obrobku, kotouče, statisticky rozložených brousicích zrn)
- z okolí (sousedící výrobní stroje, manipulační, transportní technika). [88; 91; 92]

Samobuzené kmitání vzniká bez periodického vnějšího budicího účinku. Soustava je uvedena do samobuzeného kmitání prvním impulzem, který vyvolá výchylku z rovnovážné polohy a dále kmitání probíhá bez přívodu energie z vnějšku a jeho periodická proměnlivost závisí pouze na vlastnostech kmitající soustavy. Energie, převáděná na kmitající systém, nahrazuje ztráty vzniklé tlumením. Frekvence kmitání je určena vlastnostmi kmitajícího systému a je velmi blízká vlastní frekvenci některého rozhodujícího členu systému. Prvním impulsem může být například periodické uvolňování nárůstku, v periodické tvorbě třísky, v nárazu nástroje do tvrdšího zrna v obráběném materiálu, ve změně směru řezné síly, změně součinitele tření v závislosti na rychlosti pohybu a podobně. Samobuzené kmitání při obrábění může být vyvoláno činiteli, které nesouvisí nebo přímo souvisí s procesem řezání. Z hlediska technologie výroby součástí má značný význam samobuzené kmitání vyvolané řezným procesem. Toto kmitání se objevuje jen v určitém rozmezí technologických podmínek a změnou těchto podmínek lze stabilizovat proces řezání. Nebezpečí vzniku kmitání klesá se zvyšováním tuhosti výrobních strojů [88; 91].

3.2.2 Teorie zpracování signálu

Signál je jev nesoucí informaci o stavu systému, který jej generuje, a jeho dynamice. Pro koncového uživatele však není důležitá každá informace. Cílem zpracování signálu je extrahovat ze vstupního signálu *užitečnou informaci*. Signál, který není užitečný, je označován jako *šum*. Na následujícím Obr. 3.22 je uvedena klasifikace signálů.



Obr. 3.22 Klasifikace signálů [93]

Deterministický signál je takový, jehož časový průběh je předurčen, například nějakou explicitní funkcí, proto lze jeho průběh předvídat a je poněkud jednodušší na zpracování. *Náhodný signál* má v průběhu záznamu nepředvídatelný vývoj a lze ho popsat sadou parametrů, například statistické hodnoty (střední hodnota, rozptyl), rozdělení hustoty pravděpodobnosti. Po záznamu se mohou některé složité deterministické signály jevit jako náhodné.

Deterministické signály *přechodné* jsou časově omezeny a představují záznam přechodného děje – z nulové úrovně nebo ustáleného stavu je tento signál vybuzen a k nulové úrovni nebo k témuž ustálenému stavu se vrátí (například odezva na impulsní buzení, hluk při přeletu letadla nebo přejezdu vozidla, přejezd jeřábu apod.). Deterministické *periodické* a *kvasiperiodické* signály trvají nekonečnou dobu. Periodické signály mají důležitou podskupinu, a to *harmonický signál*, kterým je sinusovka. Periodický signál je složen z harmonických signálů o frekvencích, které jsou násobkem jedné základní frekvence. Kvasiperiodický signál je složen také z harmonických signálů s frekvencemi, které jsou na rozdíl od periodického signálu násobky aspoň dvou základních frekvencí se vzájemným poměrem o velikosti, která je rovna iracionálnímu číslu.

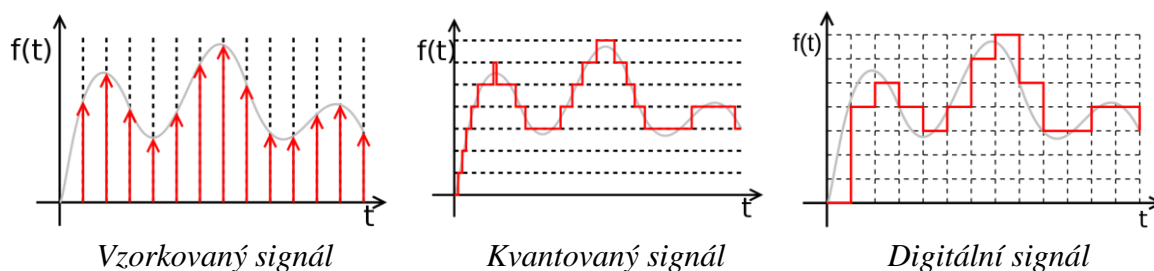
Stochastické signály se dělí na dvě podskupiny, a to *stacionární* a *nestacionární*. Že průběh signálu má ustálený (stacionární) charakter, nebo se jeho charakter v čase mění, tj. je nestacionární. Charakter průběhu signálu se může jevit za delší časové období jako ustálený, zatímco za krátký časový interval jako neustálený. Tedy klasifikace signálu je v některých případech závislá na době trvání signálu.

U signálů stochastických (náhodných) je třeba zmínit ještě dvě speciální skupiny, a to signály *úzkopásmové* a *širokopásmové*. Úzkopásmový náhodný signál je složen jen ze složek, které představují harmonické signály s frekvencemi z úzkého pásma, které je vzdáleno od nulové frekvence. Spektrum tohoto signálu obsahuje jeden vrchol. Ve svém časovém průběhu obsahuje úzkopásmový signál kmity o málo proměnlivé frekvenci, avšak s nahodile se měnící amplitudou. Širokopásmové signály jsou zcela náhodné bez stálé frekvence změn a jsou charakteristické tím, že jsou složeny z harmonických signálů s frekvencemi z širokého pásma frekvencí. Zcela náhodný signál je označován za šum.

Deterministický signál je obvykle v různém poměru smíšen se signálem náhodným.

Náhodná složka tohoto signálu je dána typicky dalšími zdroji na měřeném strojním zařízení. Strojní zařízení jsou zdrojem signálů, které mohou být souhrnně označeny za periodické nebo kvasiperiodické, což je dáno buzením periodickou činností jejich komponent, jako jsou například ozubená kola nebo ložiska [93].

Signál dále můžeme rozdělit na *spojitý nebo diskrétní signál*. Podskupinu tvoří signál analogový, kvantovaný, vzorkovaný a digitální, viz Obr. 3.23.



Obr. 3.23 Typy signálů [94]

Kvantovaný signál (kvantizovaný) je signál, jehož hodnota nemá spojitý průběh, ale mění se skokem, přičemž nabývá pouze omezeného počtu úrovní (signál spojitý v čase a diskrétní v amplitudě). Ke změně hodnoty signálu může obecně dojít v libovolném čase. Tento signál vzniká obvykle kvantováním analogového signálu. Pro převod analogového signálu na kvantovaný se používají *A/D převodníky*, pro opačný převod *D/A převodníky*. Příliš malý počet úrovní se projeví jako tak zvaný kvantizační šum, který je dán rozdílem kvantovaného signálu a původního signálu. Vzhledem k vlastnostem lidských smyslů je kvantizační šum nejvíce patrný při slabém signálu (silný signál kvantizační šum překryje). Proto se pro kvantizaci někdy používá logaritmická funkce, která způsobí, že u malých signálů jsou kvantizační kroky menší než u velkých signálů.

Vzorkovaný signál je signál, který není spojitý v čase (signál diskrétní v čase a spojitý v amplitudě). Je tvořen posloupností vzorků, které obecně mohou nabývat libovolnou hodnotu. Tento signál vzniká obvykle vzorkováním analogového signálu, přičemž počet vzorků za sekundu udává *vzorkovací frekvenci* f_{vz} .

Podle **Shannonova (Nyquistova, Kotělnikova) teorému** musí být vzorkovací frekvence f_{vz} nejméně dvakrát větší než je nejvyšší přenášená frekvence f_{max} , viz vztah (3.24), jinak dojde k tzv. **aliasingu**, kdy frekvence odebrání vzorku není dostatečně velká v porovnání s maximální frekvencí signálu, při vzorkování signálu dojde ke ztrátě informací a po převodu zpět na analogový signál se mohou ve výsledném signálu objevit falešné frekvence, které v něm původně nebyly. Vzorkovaný signál lze převést na analogový signál, který se podobá původnímu signálu před vzorkováním, pomocí integračního článku.

$$f_{vz} \geq 2 \cdot f_{max} = f_N \quad (3.24)$$

kde f_N je Nyquistova frekvence.

Řada signálů neobsahuje složky spektra s frekvencí větší než je polovina vzorkovací frekvence vzhledem k přenosovým vlastnostem čidel. Aliasing je však velmi

pravděpodobný u signálů vibrací a hluku. Měřicí mikrofony a akcelerometry mají frekvenční rozsah srovnatelný s běžnou vzorkovací frekvencí A/D převodníků. Často je vědomě volena vzorkovací frekvence velmi nízká, aby se analyzovala jen část frekvenčního spektra.

Aliasingu se čelí tzv. **antialiasingovými analogovými filtry** před A/D převodníky, které zaručují velmi vysoké potlačení frekvenčních složek s frekvencí nad polovinou vzorkovací frekvence. Jedná se o analogové (pasivní nebo aktivní) filtry s funkcí tzv. *dolní propusti*. Aliasing je zdrojem častých chyb měření, popřípadě chybné interpretace výsledků, v případě, když není před A/D převodníkem použit antialiasingový filtr a signál obsahuje složky s frekvencí, která je větší než Nyquistova frekvence. Tento filtr není součástí běžných A/D převodníků pro počítače, a proto jsou vhodné pro záznam signálu k výpočtu spekter jen pro případ, kdy toto spektrum neobsahuje kmitočty vyšší než je Nyquistova frekvence. Výrobci všech druhů signálových analyzátorů navrhují velmi pečlivě antialiasingové filtry jako součást úpravy signálu před výpočtem spektra. Pro měření spekter v akustice nebo vibracích není zatím profesionální FFT analyzátor nahraditelný běžnou kartou A/D převodníku.

Digitální signál je signál, který je vzorkovaný a následně kvantovaný (signál diskretní v čase i amplitudě). Je tvořen posloupností vzorků, které mohou nabývat pouze omezeného počtu hodnot, takže jej lze reprezentovat posloupností celých čísel. Při převodu analogového signálu na digitální vždy dochází ke ztrátě informace (jak při vzorkování tak při kvantování). Zvyšováním vzorkovacího kmitočtu a počtu úrovní kvantizace se však lze k původnímu signálu přiblížit s libovolně malou odchylkou [88; 93; 94].

Mezi elementární typy signálů řadíme **harmonický signál**, který má široké uplatnění v oboru kmitání. Harmonický signál je obecně definován jako reálná časová funkce typu

$$x(t) = a \cdot \cos \omega t + b \cdot \sin \omega t \quad (3.25)$$

kde **a**, **b** jsou reálná čísla, **ω** je úhlová rychlost a **t** je čas.

Pro úplnost je uvedena souvislost úhlové frekvence **ω** , a frekvence **f**, tj.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (3.26)$$

Ekvivalentní zápis je

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.27)$$

kde amplituda **A** a počáteční fáze **φ** , souvisejí s parametry výše uvedeného výchozího tvaru.

Fáze harmonického signálu, kterou představuje výraz **$\omega t + \varphi$** , je lineární funkcí času. V teorii signálů jsou skládány harmonické signály, které se liší v amplitudě, fázi a úhlové rychlosti. Pro tuto operaci je výhodné znázornit harmonický signál pomocí komplexních funkcí v exponenciálním tvaru. Podle Eulerova vzorce platí:

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \frac{A}{2} \exp(j(\omega t + \varphi)) + \frac{A}{2} \exp(-j(\omega t + \varphi)) \quad (3.28)$$

Analýza signálu

Signály lze analyzovat v časové a ve frekvenční oblasti. *Průběh signálu se obvykle znázorňuje v čase, jinak řečeno v časové oblasti.* Posuzování časového průběhu signálu vhodně doplňují i jeho vlastnosti prezentované rozkladem na soubor elementárních funkcí. Nejpřirozenější pro technické aplikace, nejen v oboru vibrací mechanických systémů, je *rozklad na soubor harmonických funkcí*, které se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a svou počáteční fází. Jestliže se u souboru harmonických signálů znázorní *závislost amplitudy a počáteční fáze na frekvenci*, pak je signál znázorněn ve frekvenční oblasti. Frekvenční oblast, je zvláště vhodná pro analýzu periodických nebo kvasiperiodických diagnostických signálů. Složení tohoto typu signálů se analyzuje ve frekvenční oblasti mnohem přehledněji než v časové oblasti. Časová oblast je preferována pro znázornění signálu v případě, že v jeho spektru zůstanou jen složky užitečné pro posouzení jeho časového průběhu. K vytvoření takového časového průběhu jsou potřebné úpravy, které se provádějí ve frekvenční oblasti.

Signál vibrací v časové oblasti je charakterizován třemi základními veličinami popisujícími vibrace, a to *dráha, rychlost a zrychlení*. Každá z těchto veličin může být výchozí, zatímco ostatní jsou buď analogově, nebo číslicově vypočteny, a to buď integrací, nebo derivací. Míru vibrací lze obecně vyhodnocovat z každé z těchto veličin, ale v praxi je nutné počítat s vnějšími rušivými faktory, které měřený signál mohou ovlivňovat. V technické praxi se tedy měřená veličina volí tak, aby byl její odstup od šumu co největší. Konvenčně se využívá signálu rychlosti vibrací pro ISO pásmo vibrací (ISO pásmo vibrací je 10-1000 Hz dle ČSN-ISO 10816), pro vysoké frekvence vstupního signálu se volí zrychlení vibrací a pro velmi nízké frekvence vstupního signálu se volí měření výchylky vibrací [93; 95].

Tab. 3.2 *Vzájemné vztahy mezi veličinami popisujícími vibrace* [93]

dráha	$s(t)$	$s(t) = \int v(t) dt$
rychlost	$v(t) = ds(t)/dt$	$v(t) = \int a(t) dt$
zrychlení	$a(t) = dv(t)/dt$	$a(t)$

Rozklad periodické funkce se spojitým časem na kombinaci harmonických signálů se nazývá Fourierova (nekonečná) řada. Pro obecné neperiodické funkce se používá **Fourierova transformace** [93].

Fourierova transformace obecného signálu

Rozklad obecného, tj. nejen periodického signálu, ale také neperiodického signálu na harmonické složky, lze vypočítat s pomocí Fourierovy transformace. Příkladem neperiodického signálu je osamocený obdélníkový impuls, nebo také jakákoliv jiná

neperiodická funkce. Tento rozklad obsahuje obecně složky o všech frekvencích s nekonečně malou amplitudou. Spektrum je spojitá funkce frekvence. Definiční vzorce přímé a zpětné (inverzní) Fourierovy transformace pro signál, tj. funkci $x(t)$ ve významu vzoru nebo originálu, jsou:

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (3.29)$$

$$x(t) = F^{-1}\{X(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (3.30)$$

kde funkce úhlové frekvence $X(\omega)$ má význam obrazu nebo také obecně signálu, který je transformován do frekvenční oblasti. V dalším popisu bude funkce $X(\omega)$ nazývána Fourierovo nebo komplexní spektrum. Pro existenci obrazu podle vzorce přímé transformace se matematicky klade na časovou funkci podmínka absolutní integrovatelnosti funkce a dále podmínka, aby $x(t)$ byla po částech spojitá s konečným počtem bodů nespojitosti. Absolutní integrovatelnost znamená existenci integrálu

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) dt \quad (3.31)$$

Transformační vzorce Fourierovy transformace (3.29) a (3.30) jsou lineární, a proto lineární kombinace dílčích originálů má obraz složený ze shodné lineární kombinace dílčích obrazů.

Tab. 3.3 shrnuje některé základní vlastnosti Fourierovy transformace.

Tab. 3.3 Základní vlastnosti Fourierovy transformace [93]

Originál	Obraz
$x(t), \quad -\infty < t < +\infty$	$X(\omega), \quad -\infty < \omega < +\infty$
$x'(t)$	$j\omega X(\omega)$
$\int x(t) dt$	$X(\omega)/j\omega$
$x(t - t_0)$	$X(\omega) \exp(-j\omega t_0)$
$x(t) \exp(j\omega_0 t)$	$X(\omega - \omega_0)$
$x(t)y(t)$	$\frac{1}{2\pi} X(\omega) * Y(\omega)$
$x(t) * y(t)$	$X(\omega)Y(\omega)$

Diskrétní Fourierova transformace

Definiční vztahy Fourierovy transformace vyžadují znalost matematického vyjádření signálu či spektra. Pokud však zpracováváme naměřené hodnoty, tj. známe vzorky signálu

či spektra z konečného intervalu, stojíme před problémem, jak určit spektrum ze vzorků signálu či signál ze vzorků spektra. K tomu účelu je využíváno numerické metody, která je známa jako Diskrétní Fourierova transformace (DFT). DFT je definována vztahy:

$$F_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_i \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} k i\right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.32)$$

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k \exp\left(j \frac{2\pi}{N} k i\right), \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.33)$$

Diskrétní Fourierova transformace našla velké uplatnění zejména s rozvojem výpočetní techniky. Součástí řady přístrojů jsou jednoúčelové procesory realizující tuto transformaci. Výpočet DFT podle definičního vztahu vyžaduje N^2 komplexních součinů a N^2 komplexních součtů. Toto množství operací výrazně snižovalo možnost aplikace DFT na výpočty v reálném čase.

Situace se změnila po roce 1965, kdy J. W. Cooley a J. W. Tukey popsali velmi efektivní algoritmus výpočtu DFT, tzv. **rychlou Fourierovu transformaci (FFT – Fast Fourier Transform)**, který vyžaduje zpravidla pouze hodnoty N , které jsou rovny mocnině čísla 2, tj. 256, 512, atd. Tato podmínka neplatí obecně pro diskretní Fourierovu transformaci, ale je to cena, kterou je nutné zaplatit za rychlost algoritmu FFT, která je, při frekvenční analýze, ve většině případů, mnohem důležitější. Díky algoritmu FFT se stala diskretní Fourierova transformace nejrozšířenějším prostředkem pro numerický výpočet Fourierovy transformace. Algoritmus FFT je také implementován ve všech nejrozšířenějších matematických programech jako je např. GNU Octave, Mathcad, Mathematica, Maple, Matlab atd. [89; 93; 95; 96].

3.3 Hodnocení povrchu

Během procesu slinování dochází u keramických dílů k objemovému smrštění. To znamená, že jejich rozměrová a geometrická přesnost je vzdálená hodnotám, které udává výkresová dokumentace. To platí také pro parametry struktury povrchu. Abychom zajistili požadované funkční parametry dílů, je nutné slinuté keramické díly prakticky vždy dokončit obráběním (broušení, leštění, honování, lapování, viz kapitola 2.2.1). Na výsledném povrchu a v podpovrchové vrstvě obrobeneho dílu dojde vlivem interakce obráběcího nástroje a materiálu obrobku ke změnám. Mechanické a tribologické vlastnosti dílů jsou tedy přímo ovlivněny procesem obrábění. Pro celkové hodnocení stavu povrchové a podpovrchové vrstvy, vzniklé působením fyzikálních a chemických vlivů procesu obrábění, je používán termín *integrita povrchu*. Hodnocení integrity povrchu zahrnuje:

- rozměrovou a geometrickou přesnost,
- parametry struktury povrchu (drsnost povrchu a jeho profil),
- strukturní a fázové změny,
- tvrdost,
- zbytková napětí,
- povrchové vady (trhliny, praskliny),
- chemické složení,
- fyzikální a chemické vlastnosti [97; 98-100].

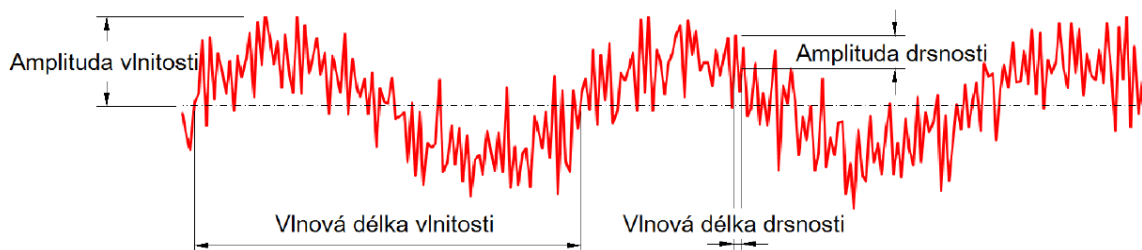
Drsnost povrchu u keramických materiálů je negativně ovlivněna velkým průřezem třísky. Obecně lze lepší drsnosti povrchu dosáhnout broušením keramiky v režimu tvárného oddělování materiálu. Za tímto účelem je vhodné aplikovat brousící kotouče s nízkou zrnitostí a jako procesní kapaliny využít minerální oleje.

Parametry struktury povrchu

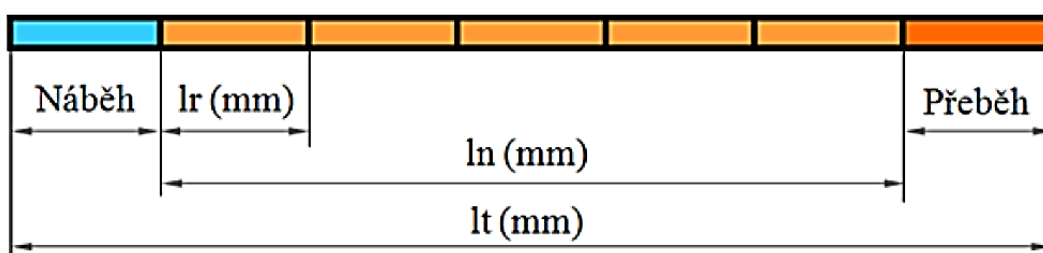
Cílem uvedeného výzkumu nebylo komplexní hodnocení integrity broušeného povrchu. Z široké škály kritérií kvality povrchu byly vybrány 2D parametry struktury povrchu. Struktura povrchu je definována jako odchylka od ideálního funkčního povrchu, přičemž nezahrnuje náhodné vady na povrchu (trhliny, praskliny, rýhy a podobně). Pro potřeby vyhodnocení byly využity nejběžnější charakteristiky, a to profil drsnosti (parametry drsnosti R odvozené z profilu drsnosti) a profil vlnitosti (parametry vlnitosti W odvozené z profilu vlnitosti). Rozlišení drsnosti a vlnitosti, včetně popisu vlnových délek a amplitud je uvedeno na *Obr. 3.24*. Dále také rozlišujeme parametry P odvozené ze základního profilu. Nejběžnější parametry, včetně definice a výpočtu, jsou uvedeny v

Obr. 3.25 popisuje jednotlivé délky, v jejichž rozsahu se vyhodnocují jednotlivé parametry struktury povrchu. Některé parametry profilu jsou vyhodnocovány na **základní délce** l_p , l_r , l_w (tzv. *sampling length*), která se číselně rovná mezní vlnové délce *cut-off* λ_c .

Jiné parametry jsou posuzovány na **vyhodnocované délce** (tzv. *evaluation length*), která je určena jako 5-ti násobek základní vlnové délky [101].



Obr. 3.24 Popis vlnových délek vlnitosti a drsnosti povrchu [101]



lr (mm) – základní délka profilu drsnosti

ln (mm) – vyhodnocovaná délka profilu

lt (mm) – celková délka snímání

n (-) – počet základních délek (1,3,5)

Obr. 3.25 Měřicí dráha dotykového snímače a popis délek pro vyhodnocování struktury povrchu [88]

Tab. 3.4 Délkové parametry [101]

Parametr základního profilu	Parametr drsnosti	Parametr vlnitosti	Definice parametru	Výpočet parametru
Průměrná šířka prvků profilu				
PSm	RSm	WSm	Aritmetický průměr šířek prvků X_s prvků profilu v rozsahu základní délky	$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{s_i}$

Tab. 3.5 Tvarové parametry [101]

Parametr základního profilu	Parametr drsnosti	Parametr vlnitosti	Definice parametru
Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu			
Pdq	Rdq	Wdq	Kvadratický průměr sklonů pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky

Tab. 3.6 Výškové parametry (výstupky a prohlubně) [101]

Parametr základního profilu	Parametr drsnosti	Parametr vlnitosti	Definice parametru	Výpočet parametru
Největší výška výstupku profilu				
Pp	Rp	Wp	Největší výška výstupku profilu v rozsahu základní délky	$Max(Zp_i)$
Největší hloubka prohlubně profilu				
Pv	Rv	Wv	Největší hloubka prohlubně profilu v rozsahu základní délky	$Max(Zv_i)$
Největší výška profilu *				
Pz	Rz	Wz	Součet výšky největšího výstupku a hloubky nejhlubší prohlubně v rozsahu základní délky	$Max(Zp_i) + Max(Zv_i)$ $\rightarrow Rz = Rp + Rv$
Průměrná výška profilu				
Pc	Rc	Wc	Průměrná hodnota výšek Zt prvků profilu v rozsahu základní délky	$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i$
Celková výška profilu				
Pt	Rt	Wt	Součet výšky největšího výstupku a hloubky nejhlubší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky	$\rightarrow Rt \geq Rz$

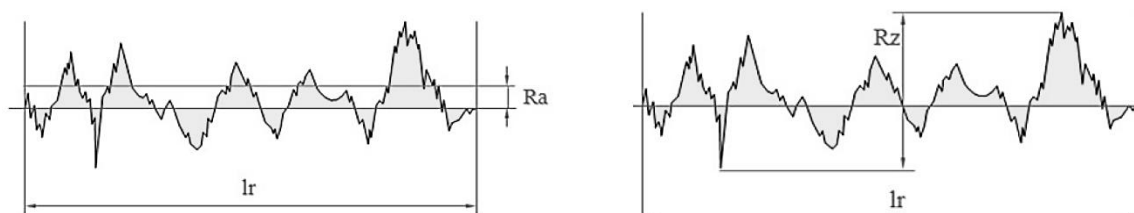
* V normě ISO 4287-1:1984 byl tento parametr původně definován jako „výška nerovností z deseti bodů“. Tento parametr již není používán a není zaměnitelný se stávajícím parametrem Rz.

Tab. 3.7 Výškové parametry (průměrné hodnoty souřadnic [101])

Parametr základního profilu	Parametr drsnosti	Parametr vlnitosti	Definice parametru	Výpočet parametru
Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu				
Pa	Ra	Wa	Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic Z(x) v rozsahu základní délky	$\frac{1}{l} \int_0^l Z(x) dx$
Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu				
Pq	Rq	Wq	Kvadratický průměr pořadnic Z(x) v rozsahu základní délky	$\sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}$
Šikmost posuzovaného profilu (skewness)				
Psk	Rsk	Wsk	Míra symetrie a hustoty pravděpodobnosti hodnot pořadnic vyhodnocovaných v rozsahu zákl. délky	$\frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{l} \int_0^l Z^3(x) dx \right]$
Špičatost posuzovaného profilu (kurtosis)				
Pku	Rku	Wku	Míra špičatosti hustoty pravděpodobnosti hodnot pořadnic vyhodnocovaných v rozsahu zákl. délky	$\frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{l} \int_0^l Z^4(x) dx \right]$

Tab. 3.8 Křivky a odpovídající parametry [101]

Parametr základního profilu	Parametr drsnosti	Parametr vlnitosti	Definice parametru	Výpočet parametru
Materiálový poměr profilu (nosný podíl)				
Pmr(c)	Rmr(c)	Wmr(c)	Poměr délky materiálu prvků profilu Ml(c) na dané úrovni c vztažený k vyhodnocované délce	$\frac{Ml(c)}{l_n}$
Rozdíl výšky úseku profilu				
Pdc	Rdc	Wdc	Svislá vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru	$C(Rmr1) - C(Rmr2)$
Vzájemný materiálový poměr				
Pmr	Rmr	Wmr	Materiálový poměr určený na úrovni části profilu Rdc, vztažený k úrovni C0	
Empirické rozdělení výšek profilu				
			Hustota pravděpodobnosti pořadnic Z(x) v rozsahu vyhodnocované délky	



Obr. 3.26 Schématické znázornění parametrů drsnosti Ra a Rz [88]

Techniky vyhodnocování struktury povrchu

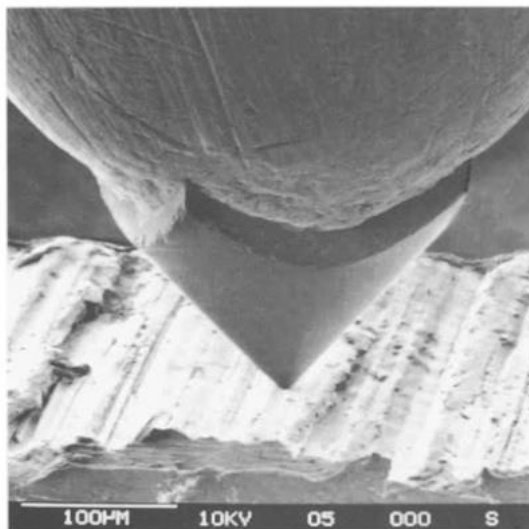
a) Kontaktní metoda

Zařízení pracující na dotykovém principu jsou osazeny diamantovým hrotem, který se pohybuje po zkoušeném povrchu. Během posuvu hrotu po povrchu (horizontálně, směr osy X) je pohyb hrotu ve směru osy Z (vertikálně) převáděn elektrický signál. Tento signál je zpracován softwarem, v jehož prostředí se obsluze zařízení zobrazí hodnoty požadovaných charakteristik povrchu. Dalším způsobem sběru dat u dotykových systémů je využití polohové zpětné vazby motoru pohonné jednotky. Na základě známé rychlosti motoru, může být v daném časovém okamžiku určena poloha hrotu. Druhá metoda spoléhá na to, že otáčky motoru jsou konstantní.

Při dotykovém měření pomocí diamantového hrotu je nutné dbát na to, aby byl poloměr hrotu dostatečně malý tak, aby mohl věrohodně sledovat strukturu povrchu. Pokud se na měřené ploše vyskytují úzké prohlubně, má hrot tendenci tato místa vynechávat. Dochází tak k mechanické filtraci některých dat.

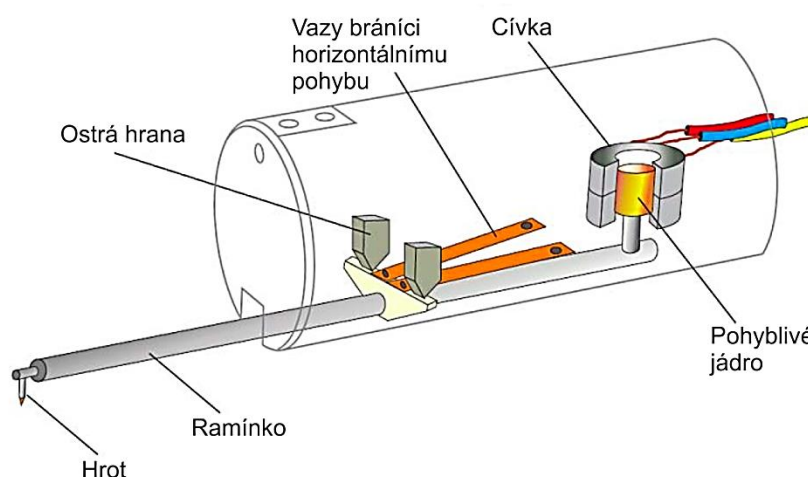
Vzhledem k tomu, že se diamantový hrot pohybuje přímo po měřeném povrchu, je

nutné dbát opatrnosti při měření materiálů náchylných k poškození poškrábáním. Následující snímek demonstruje posuv hrotu po povrchu honované součásti.



Obr. 3.27 Kuželový dotyk s vrcholovým úhlem 90 ° kopíruje honovaný povrch – snímek SEM, zvětšení 200x [102]

Pro měření drsnosti povrchu zkoušených vzorků byl použit **dotykový profiloměr Form Talysurf Intra** od firmy Taylor Hobson, který využívá první uvedenou metodu snímání povrchu. Jedná se o zařízení s absolutními snímači. Zároveň přístroj Form Talysurf Intra nepoužívá opěrku (vodící patku), a proto je možné vyhodnocovat jak parametry drsnosti povrchu, tak parametry vlnitosti s absolutní spolehlivostí získaných výsledků. Součástí jeho konstrukce je indukční převodník pohybu hrotu na elektrický signál, viz *Obr. 3.28*. [103- 105].



Obr. 3.28 Konstrukce hrotu a převodníku přístroje Form Talysurf Intra [104]

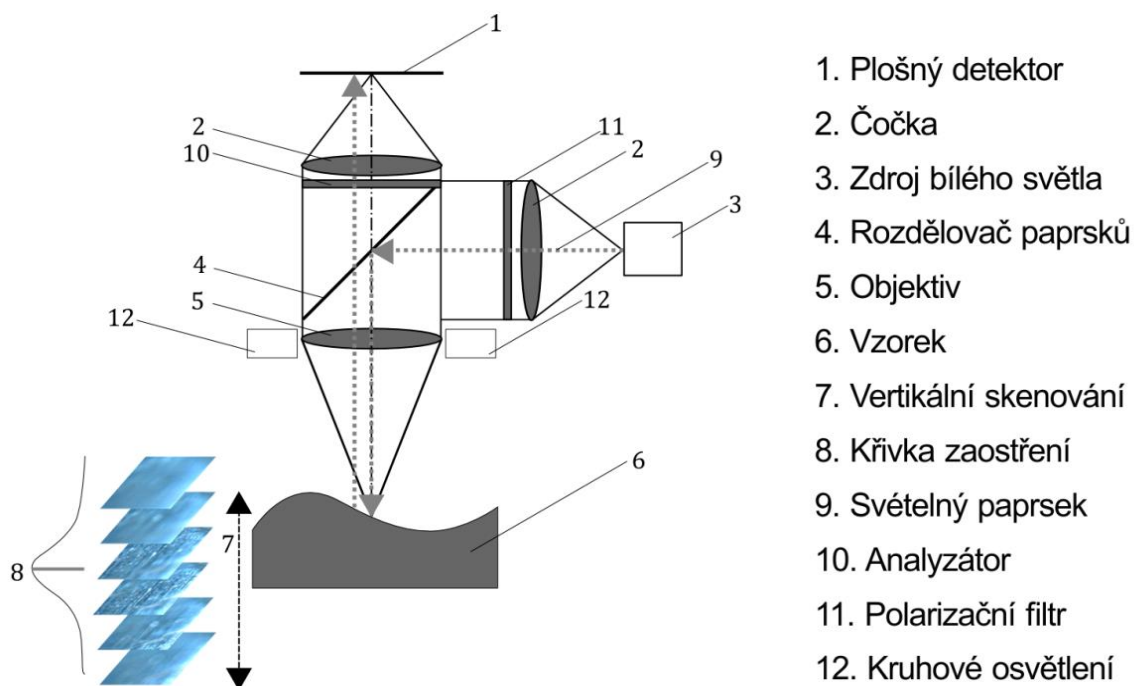
b) Bezkontaktní optická metoda

Potřeba hodnocení povrchu broušených vzorků přesáhla v určitých aspektech možnosti

dotykového profiloměru, proto byl povrch reprezentativních vzorků nasnímán také optickým měřicím systémem, který má pro potřeby tohoto výzkumu širší možnosti vyhodnocení. Jedná se o **optický 3D měřicí přístroj InfiniteFocus G4** od firmy Alicona.

Tento systém pracuje na principu „Focus-Variation“ (technologie IFM – Infinite Focus Microscope). Jedná se o metodu, která kombinuje malou hloubku ostrosti jednotlivých snímků optického systému-mikroskopu se skenováním ve směru kolmém na měřený povrch. Výsledný sken je poskládán z jednotlivých zaostřených snímků.

Systém pracuje s bílým světlem, které vystupuje ze světelného zdroje a přes objektiv je zaměřeno na povrch vzorku. V závislosti na topografii povrchu vzorku se světlo odrazí v různých směrech. Všechny odražené paprsky jsou zaznamenány senzorem v optické části mikroskopu. Vzhledem k malé hloubce ostrosti jsou ostře zobrazeny pouze malé oblasti objektu. K úplnému ostrému nasnímáním povrchu je potřeba pohybovat optikou ve směru kolmém na povrch (podél optické osy) a současně provádět snímání dat v jednotlivých hladinách, na které je zaostřeno. Na základě 2D snímků z jednotlivých hladin je, pomocí algoritmů, provedena kompletní rekonstrukce 3D povrchu, včetně opakovatelného, ostrého zobrazení povrchu ve skutečných barvách. Na Obr. 3.29 je zobrazen princip metody [101; 106- 110].



Obr. 3.29 Schéma principu technologie „Focus-Variation“ [110]

c) Strojové vidění

Pojmem strojové vidění (z angličtiny Machine Vision) je označována široká škála technik a aplikací, které mají jeden společný znak - *2D nebo 3D obraz reálného objektu je digitalizován a zpracován pomocí počítačového softwaru*. Strojní vidění proto vyžaduje komplexní znalosti z oborů optiky, senzoriky, z oblasti světelné techniky, stejně jako

znalost počítačových algoritmů a nástrojů pro zpracování obrazu.

Nasazení systémů strojového vidění je čím dál tím častější. Hlavní zásluhu na jejich rozmachu má neustálý vývoj a miniaturizace digitálních kamer a masivní výpočetní výkon moderních počítačů, který umožňuje zpracování enormního množství dat prakticky v reálném čase. Aplikace je možno nalézt téměř všude: od jednoduché kontroly přítomnosti a rozměrů součástí při sériové výrobě, přes automatickou kontrolu a třídění potravin na základě jejich kvality, až po automatizovanou rekognoskaci lidských tváří například na letištích. Strojové vidění je také jedním ze základních předpokladů úspěšného nasazení autonomních vozidel, kdy kamery a software nahrazují vidění a rozhodování řidiče (*Obr. 3.30*). Ve strojírenské praxi se stále častěji vyskytují aplikace se strojovým viděním na robotech, kdy je kamerový systém integrován přímo do zpětnovazební smyčky řízení robota a umožňuje mu tak dynamické "chování" jako je například uchopování náhodně uložených dílů (*Bin Picking Obr. 3.31*), zpřesňování polohy, nebo zabránění kolize.



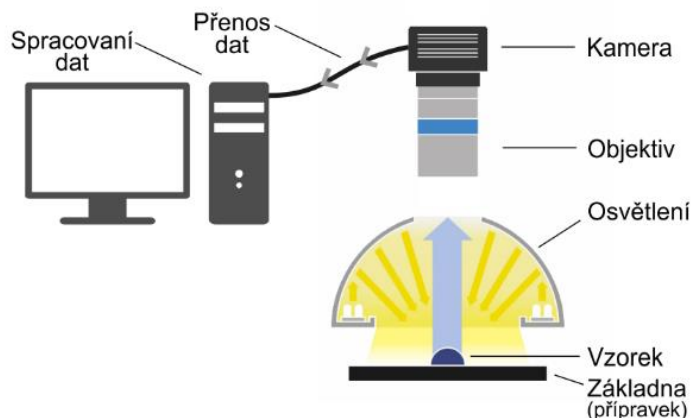
Obr. 3.30 Aplikace strojového vidění v dopravním provozu [111]



Obr. 3.31 Uchopování náhodně uložených dílů na základě informace z kamery [112]

Pro potřeby této práce bude dále pod pojmem strojové vidění označeno **určování rozměrů a vzdálenosti objektů z 2D obrazu**, tedy z fotografie. To umožní objektivně

zhodnotit vizuální kvalitu povrchu opracovávaných vzorků a rozměrové vyhodnocení případných vad. Schéma systému strojového vidění je na *Obr. 3.32*.



Obr. 3.32 Schéma systému strojového vidění

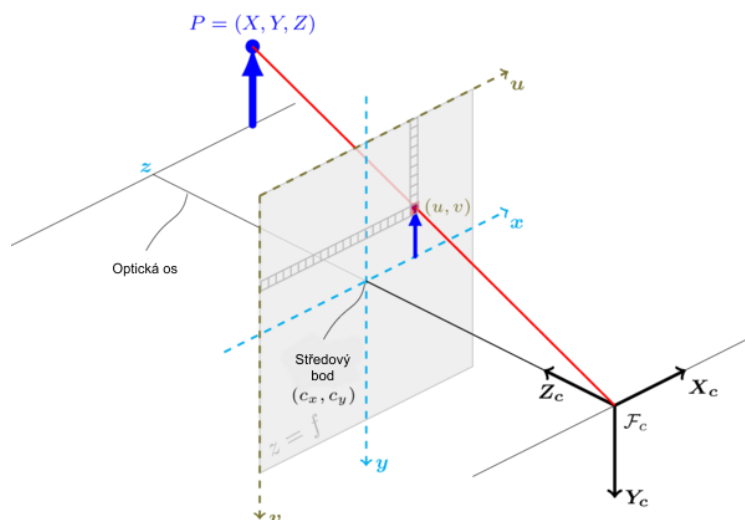
Pro vyhodnocení reálných rozměrů z 2D obrazu je nutná kalibrace polohy kamery vůči vzorku a určení škálovací konstanty systému strojového vidění. Základní metodou pro kalibraci je matematický model šterbinové kamery (ang. Pinhole Camera), který lineárně transformuje bod z 3D prostoru do 2D prostoru. Je popsán funkcí:

$$s \cdot m' = A \cdot [R|t] \cdot M' \quad (3.34)$$

nebo maticovým tvarem

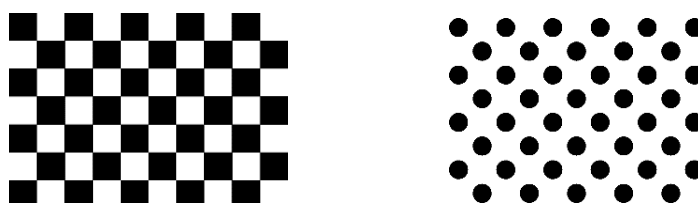
$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

kde \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z} jsou koordináty 3D bodu v reálném prostoru, \mathbf{u} , \mathbf{v} jsou koordináty pixelů projektovaného bodu, \mathbf{A} je funkce/matice vlastních parametrů kamery, \mathbf{c}_x , \mathbf{c}_y jsou souřadnice středového bodu a \mathbf{f}_x , \mathbf{f}_y jsou ohniskové vzdálenosti vyjádřeny v pixelech, viz také *Obr. 3.33* [113].



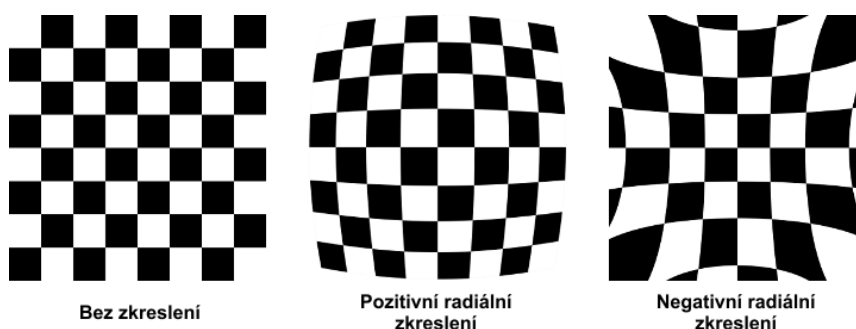
Obr. 3.33 Schéma modelu štěrbinové kamery [113]

Popsaný typ kalibrace vyžaduje na vstupu známý obrazec, typicky pravidelný 2D vzor tvořený z bodů nebo čtverců. Příklady kalibračních obrazců je uveden na Obr. 3.34



Obr. 3.34 Příklady kalibračních obrazců [114]

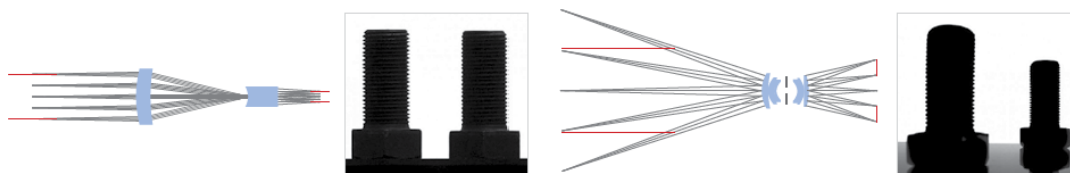
Výstupem kalibrace jsou parametry vlastní, intrinžické matice popisující soustavu kamera-objektiv a parametry vnější, extrinžické matice, popisující 3D natočení kamery v prostoru vůči referenční rovině. Model štěrbinové kamery ale neuvažuje s reálnými vadami optických soustav jako je zkreslení objektivu (viz Obr. 3.35), astigmatismus, chromatická a sférická aberace, atd. Na jejich kompenzaci je nutné využít některou z pokročilých metod nelineárních typů kalibrace.



Obr. 3.35 Typy zkreslení objektivu [113]

Po kalibraci je nutnou podmínkou pro správné vyhodnocování rozměrů dílu z 2D obrazu fixní poloha kamery a konstantní vzdálenost mezi objektivem a měřeným vzorkem. V případě jejich změny je nutné kalibraci opakovat. Také je nezbytné zajistit stejnou výšku

měřených vzorků. Při jejich změně by se totiž projevil vliv perspektivy a bez kalibrace na novou výšku by měření nebylo přesné. V průmyslové praxi často nastávají případy, kdy není technicky možné nebo finančně efektivní zajišťovat stejnou vzdálenost nebo polohu snímaného objektu od kamery. Proto existují systémy strojového vidění, které vliv perspektivy téměř úplně eliminují a to přímo na fyzikální úrovni. K tomuto účelu slouží telecentrická optika, která na kameru propouští jen kolimované paprsky světla, tedy takové, které jsou rovnoběžné s optickou osou. Díky tomu se nároky na polohování dílů rapidně sníží a objekty jsou zobrazeny bez perspektivy. Schématické srovnání telecentrického objektivu (v levé části obrázku) s klasickým, endocentrickým, je znázorněno na *Obr. 3.36*. Dva stejně velké objekty (metrický šroub) jsou z důvodu perspektivy v případě klasického objektivu zobrazeny jako různě velké. V případě použití telecentrického objektivu se při stejném scénáři zobrazují díly správně, tedy rovnou velké. Nevýhodou tohoto speciálního typu optiky je výrazně vyšší cena a podmínka, že snímáný objekt musí být menší, než fyzický průměr objektivu. To limituje jejich nasazení na snímání menších objektů, řádově do 250 mm.



Obr. 3.36 Schématické srovnání telecentrického objektivu s endocentrickým [115]

4 Experimentální část

4.1 Experimentální podmínky

4.1.1 Obráběný materiál

Karbid křemíku SiC je chemická sloučenina uhlíku a křemíku. V přírodě se vyskytuje velmi vzácně jako nerost s názvem moissanit, který je svou tvrdostí velmi blízký diamantu [116]. Karbid křemíku se v současnosti vyrábí synteticky a kromě šperkařství (kde se používá jako náhražka diamantu), má zásadní význam v oblasti špičkových technologií.

Nejčastěji se SiC vyrábí procesem podle Achesona (1893, Edward Goodrich Acheson si nechal patentovat výrobní proces SiC prášku i elektrickou pec k tomuto účelu) [4]. Metoda spočívá v karbotermické redukci oxidu křemičitého SiO_2 při teplotách až $2600\text{ }^\circ\text{C}$ ($\text{SiO}_2 + 3\text{C} \rightarrow \text{SiC} + 2\text{CO}$) [1].

Karbid křemíku je převážně kovalentní sloučenina (poměr kovalentní vazby k iontové je 9:1) [1]. Vyskytuje se ve dvou technologicky významných krystalografických modifikacích – nízkoteplotní kubická β -SiC (3C-SiC) a vysokoteplotní, většinou hexagonální α -SiC (2H, 4H, 6H). SiC může dále krystalizovat ve struktuře romboedrické [1; 9; 117; 118].

Pro výrobu konstrukčních dílů z SiC existuje několik metod. Mezi nejvýznamnější patří zejména reakční slinování, lisování za horka a klasické slinování [1]. Výsledné mechanické vlastnosti závisí na způsobu výroby.

Karbid křemíku má vynikající vlastnosti. Jedna se zejména o vysokou tvrdost, vynikající otěruvzdornost, nízkou měrná hmotnost, výborné kluzné vlastnosti, vysoká odolnost proti korozi, nepropustnost pro kapaliny ani plyny, vysoká teplotní odolnost, nízký koeficient teplotní roztažnosti, dobrá tepelná vodivost a v porovnání s dalšími typy pokročilých keramik vysoká odolnost proti teplotním šokům. Vlastnosti SiC přinášejí řadu výhod při konstrukci součástí a vymezují oblast použití tohoto materiálu – například korozivzdorné kontejnery, potrubí a armatury do náročných podmínek chemické či ropné výroby a energetiky, hořáky, trysky, přesná valivá i kluzná ložiska, třídící a mlecí technika, těsnicí kroužky, lopatky oběžných kol, části motorů, pancíře, součásti v automobilovém a leteckém průmyslu, zrcadlová optika nebo lisovací formy pro skleněné čočky. Díky chemické nezávadnosti nachází uplatnění i v potravinářském průmyslu. Karbid křemíku je zároveň materiálem částečně vodivým, jeho použití se tedy rozšiřuje i o polovodičové aplikace [119].

Pro zkoušky broušení byly připraveny vzorky vyrobené ze slinutého karbidu křemíku (SSiC), jehož výrobcem je společnost CeramTec Czech Republic s.r.o., Šumperk. Rozměry každého vzorku před realizací zkoušek byly $50 \times 50 \times 8,5\text{ mm}$. Specifikace materiálu jsou uvedeny v následujících tabulkách. Fázové složení materiálu vzorků je uvedeno v *Tab. 4.1* a bylo určeno fázovou analýzou, jež byla provedena pomocí rentgenové práškové difrakce (XRD). V *Tab. 4.2* jsou uvedeny mřížkové parametry nalezených fází a v *Tab. 4.3*

konkrétní vlastnosti materiálu.

Tab. 4.1 Fázové složení požitých vzorků a hustota jednotlivých fází [hm%].

Fázové složení	0,2% grafit 2H	6,9% SiC 4H	85,7% SiC 6H	7,3% Si
Hustota ρ [g·cm ⁻³]	2,2374	3,2212	3,2112	2,3371

Tab. 4.2 Mřížové parametry nalezených fází.

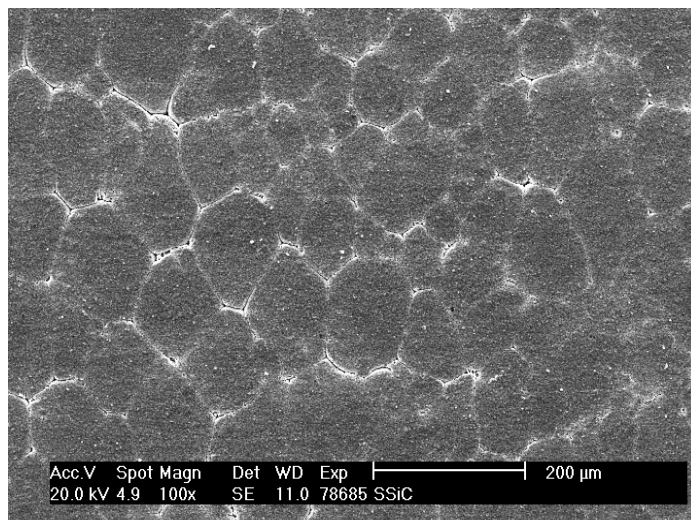
	a = b [Å]	c [Å]
C – grafit 2H	2,45	6,71
SiC – Moissanit 4H	3,07	10,08
SiC – Moissanit 6H	3,08	15,1

* Všechny fáze v tabulce mají hexagonální strukturu. ($\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$)

Tab. 4.3 Vlastnosti obráběného materiálu dle výrobce [119]

Slinutý karbid křemíku SSiC			
Obchodní název			Rocar®S1
Výrobce			CeramTec Czech Republic s.r.o.
Vlastnosti			
Lomová houževnatost K _{IC}		MPa·m ^{1/2}	4,1
Pevnost v tlaku		MPa	3500
Pevnost v ohybu 20 °C		MPa	410
Modul pružnosti E		GPa	430
Weibullův modul m			> 10
Poissonovo číslo μ			0,17
Tvrdost HV		HV 0,5	2300
Měrná hustota ρ		g·cm ⁻³	3,15
Tepelná vodivost 20 - 100 °C		W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	115
Koef. tepelné roztažnosti α	20 - 200 °C	10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	3
	20 - 400°C		3,6
	20 - 600°C		4,1
	20 - 1000°C		4,6
Maximální použitelná teplota		°C	1500 (1800)
Měrný elektrický odpor	20 °C	Ω·cm	1,10 ³
	400 °C		<10

Na Obr. 4.1 je zobrazena struktura zkoušeného materiálu nasnímaná rastrovacím elektronovým mikroskopem.



Obr. 4.1 Struktura materiálu vzorku

4.1.2 Použitý nástroj

V Tab. 4.4 jsou uvedeny parametry nástroje – diamantového brousicího kotouče 6-2-2-175-20/2 B-XV D107 K100. Brousicí kotouč nebyl během zkoušek orovnáván.

Tab. 4.4 Parametry brousicího kotouče 6-02 2-175-20/2 B-XV D107 K100 [120].

Výrobce	Interní značení	Typ (tvar) kotouče	Rozměry kotouče	Pojivo	Druh brusiva	Zrnitost brusiva	Koncentrace brusiva
Uridiamant, s.r.o.	6-2	2 - 175 - 20 / 2		B - XV	D 107		K100
		Obvodový	Průměr kotouče D = 175 mm Tloušťka kotouče T = 20 mm Tloušťka brousicí vrstvy X = 2 mm	Pryskyřičné	Diamant	Střední velikost zrn 107 μm	0,88 g·cm ⁻³

4.1.3 Použitý výrobní stroj

Experimentální broušení bylo realizováno na rovinné vodorovné brusce JUNKER BPH 320A, jejíž vybrané parametry jsou uvedeny v Tab. 4.5. Během broušení bylo prováděno chlazení procesní kapalinou ECOCOOL S-10 BAF-L s koncentrací 5 %.

Na Obr. 4.2 je fotografie testovacího stroje BPH320A, který je součástí vybavení laboratoří Ústavu strojírenské technologie, FSI VUT v Brně.

Tab. 4.5 Parametry brusky BPH 320A [121].

Celková výška stroje	mm	2125
Hmotnost stroje	kg	3345
Rozměry brousicího kotouče D x š x D_D	mm	250x32x76
Upínací plocha stolu	mm	320x1000
Otáčky brousicího kotouče n_{s1} - stupeň I.	min ⁻¹	2522
Otáčky brousicího kotouče n_{s2} - stupeň II.	min ⁻¹	3319

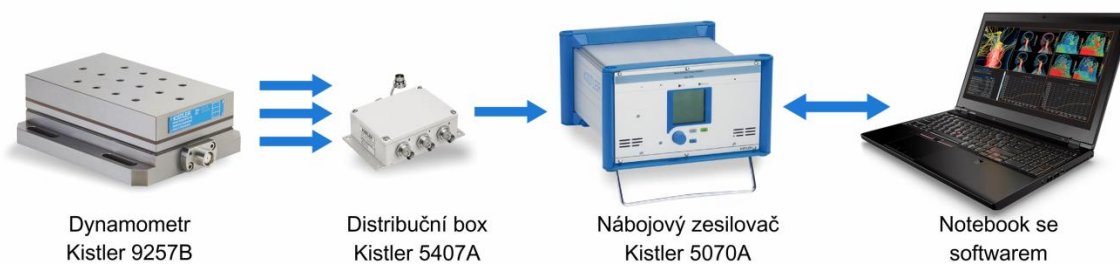


Obr. 4.2 Vodorovná rovinná bruska BPH320A

4.1.4 Měřicí technika

Měření silového zatížení

Pro měření silového zatížení byl použit tříosý **piezoelektrický dynamometr KISTLER 9257B s nábojovým zesilovačem 5070A**. Schéma zapojení aparatury během měření je zobrazeno na *Obr. 4.3*



Obr. 4.3 Schéma zapojení dynamometru při měření

Čas měření byl nastaven na 4 s a vzorkovací frekvence byla nastavena na hodnotu 1000 Hz. Měřicí sonda byla umístěna na lineárním pojezdu stolu brusky, pod svěrákem. Osa X byla totožná se směrem posuvu stolu, osa Y směřovala kolmo na směr posuvu a osa Z směřovala vzhůru, k vřetenu. Souřadný systém je znázorněn na *Obr. 4.6*.

Měření vibrací

Záznam a vyhodnocení vibrací stroje byl realizován pomocí přenosného signálového analyzátoru firmy **Brüel&Kjaer, model Photon**. Ten umožňuje díky výkonnému 32 bitovému DSP (Data Signal Processor) zpracovávat signál v časové i frekvenční oblasti rychlostí až 84 kHz, a to v reálném čase. Jeho dynamický rozsah je až 115 dB. Analyzátor obsahuje kompletní vstupní elektroniku (napájení senzoru, vstupní zesilovač, programovatelný filtr se spodní propustí, A/D převodník,...) a USB výstup pro spojení s počítačem. Jako vstupní senzor byl k analyzátoru připojen tříosý CCLD akcelerometr typu Brüel&Kjaer 4525B. Jeho kalibrovaný frekvenční rozsah je od 5 Hz do 10 kHz. Samotný sonda (senzor) váží jen 6 gramů, proto bylo možné její upnutí přímo na kryt vřetene brusky bez negativního ovlivnění procesu broušení. Souřadný systém sondy byl zorientován v souladu se souřadným systémem dynamometru. Vzorkovací frekvence byla nastavena na maximální rozsah použitého akcelerometru, tedy 10 kHz.

Zaznamenané průběhy vibrací, pro každý broušený vzorek a pro každý měřený kanál zvlášť, byly uloženy a následně analyzovány v počítači. Na vyhodnocení byl použit **software RT Pro Photon od firmy LDS Dactron**, který je dodáván přímo se signálovým analyzátozem. Software umožňuje kompletní zpracování signálu v časové i frekvenční oblasti. Na přechod z časové do frekvenční oblasti využívá algoritmus rychlé Fourierovy transformace. Na tomto místě je vhodné poznamenat, že výpočty FFT realizováno pomocí softwaru RT Pro Photon jsou velmi rychlé, nesrovnatelně rychlejší než zpracování pomocí softwaru MS Excel. Nevýhodou softwaru RT Pro Photon je však jeho nestabilita, kdy program často a neočekávaně "padl", bez možnosti uložit právě realizovanou analýzu.

Měření struktury povrchu

Měření parametrů struktury povrchu dotykovou metodou bylo realizováno pomocí **profiloměru Form Talysurf Intra od firmy Taylor Hobson Ltd.** Zařízení používá ke zpracování a vyhodnocování naměřených dat **software Ultra**. Parametry drsnosti povrchu byly změřeny v axiálním i radiálním směru, přičemž předmětem vyhodnocování byl směr axiální (rovnoběžně s osou broušícího kotouče = kolmo na podélný posuv stolu brusky). Parametry přístroje Form Talysurf Intra jsou uvedeny v *Tab. 4.6*.

Tab. 4.6 Základní parametry přístroje Form Talysurf Intra [104]

Vertikální rozsah / rozlišení	1 mm / 16 nm
Horizontální pojezd	50 mm
Nejistota přímosti na 50 mm	0,40 μm
Horizontální rozlišení	0,50 μm
Poloměr zaoblení měřícího hrotu	2 μm

Pro bezdotykové optické měření byl využit přístroj **IFM G4** od firmy **Alicona** (viz Obr. 4.4). K vyhodnocování byl použit software IF-Laboratory Measurement. Parametry měření jsou uvedeny v Tab. 4.7.

Tab. 4.7 Parametry nastavené při měření vzorků [107]

Použité zvětšení	50x
Pracovní vzdálenost [mm]	11
Vertikální rozlišení [nm]	20
Měřicí rozsah na jeden záběr XxY [mm]	0,32x0,32
Minimální měřitelná drsnost povrchu Ra [μm]	0,06
Velikost skenované plochy [mm]	2 x 20



Obr. 4.4 Alicona IFM G4 [107]

Tab. 4.8 Soustava strojového vidění a parametry jednotlivých součástí

Fotoaparát	Canon EOS 80D, 6000x4000 pix, RGB
Objektiv	Canon EF 100mm f/2,8 L Macro IS USM
Osvětlení	CCS HPD2-400SW, bílá barva
Kalibrační etalon	Opto Engineering, model PT036-056

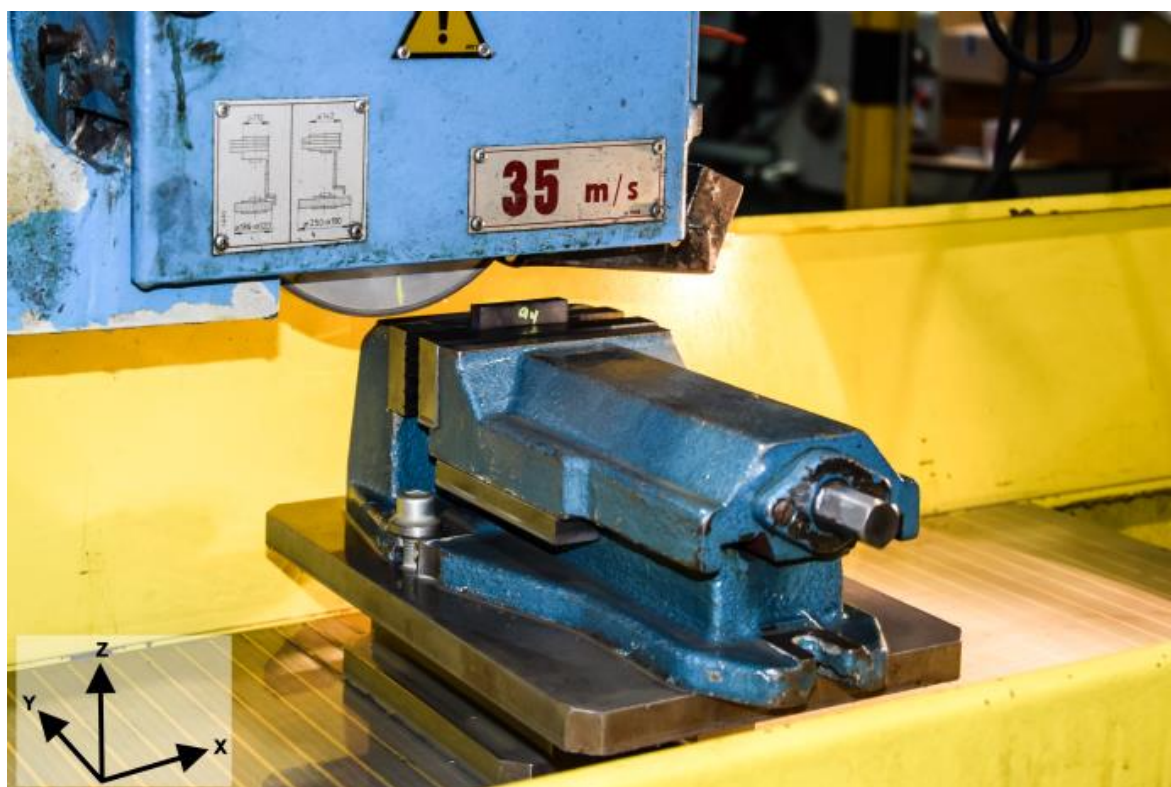
Pomocí **sestavy strojového vidění** a **softwaru Halcon** byly vyhodnoceny rozestupy periodických čar na jednotlivých vzorcích. K tomu bylo nezbytné provést kalibraci sestavy strojového vidění a najít kalibrační konstanty pro správné škálování obrazu. Do přípravku (do stejné výšky jako vzorky) byl upnut kalibrační etalon od firmy Opto Engineering, konkrétně model PT036-056. Jedná se o destičku rozměrů 66 x 52 x 3 mm z čirého skla, na níž je napařená chromová vrstva ve tvaru přesné šachovnice, jak je zachyceno na Obr. 4.5. Vzhledem k informativnímu charakteru měření byla pomocí softwaru aplikována lineární kalibrace (nelineární kalibrace kompenzuje i vady použitého objektivu, ale je časově i výpočetně značně náročnější). Výsledné škálovací konstanty byly 176 pix/mm v podélném směru obrazu a 175,85 pix/mm v příčném směru.



Obr. 4.5 Kalibrační destička Opto Engineering PT036-056

4.2 Průběh experimentu

Experimentální soustava Stroj-Nástroj-Obrobek-Upínač je zobrazena na Obr. 4.6 Sestava experimentu včetně souřadného systému. Na kryt vřetena brusky byl magneticky upnut trojosý akcelerometr za účelem zaznamenání průběhu vibrací. Mezi svěrák a magnetický lineární pojezd brusky byl uchycen trojosý dynamometr na zaznamenání průběhu silového zatížení. Osy obou měřících systémů byly zorientovány souhlasně tak, jak je zobrazeno na Obr. 4.6.



Obr. 4.6 Sestava experimentu včetně souřadného systému

Broušení bylo provedeno na ploše obrobku $50 \times 8,5 \text{ mm}^2$. V prvním kroku byla vždy každá testovaná plocha přebroušena tak, aby byla zajištěna rovinnost vzorku vůči nástroji. První záběr byl proveden nesousledně, vyjiskřovací záběr potom sousledně. Vzhledem k tomu, že broušení bylo realizováno bez příčného posuvu stolu, byl po testování každý

vzorek přebroušen celou plochou kotouče tak, aby se na funkční ploše nevytvořil zápich.

V průběhu experimentu byly nastavovány všechny kombinace řezných podmínek tak, jak jsou uvedeny v tabulce 3.6. Primárním cílem experimentu bylo zjistit míru vlivu řezných podmínek na výslednou kvalitu povrchu obrobku.

Tab. 4.9 Experimentální podmínky

Řezná rychlost vypočtená v_c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Posuvová rychlost vypočtená v_f [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Pracovní (radiální) záběr a_e [mm]
$v_{c1} = 23,1$	$v_{f1} = 6,25$	$a_{e1} = 0,01$
$v_{c2} = 30,4$	$v_{f2} = 11,39$	$a_{e2} = 0,03$
	$v_{f3} = 16,84$	$a_{e3} = 0,05$
		$a_{e4} = 0,07$

Samotnému experimentu předcházelo testovací broušení. Jeho cílem bylo ověřit správné a funkční zapojení měřicích systémů a jejich nastavení, stejně jako kontrolu stroje a dalších součástí. Speciální pozornost byla věnována upnutí brousicího kotouče na vřeteno tak, aby byl minimalizován vliv jeho házení na výsledky experimentu.

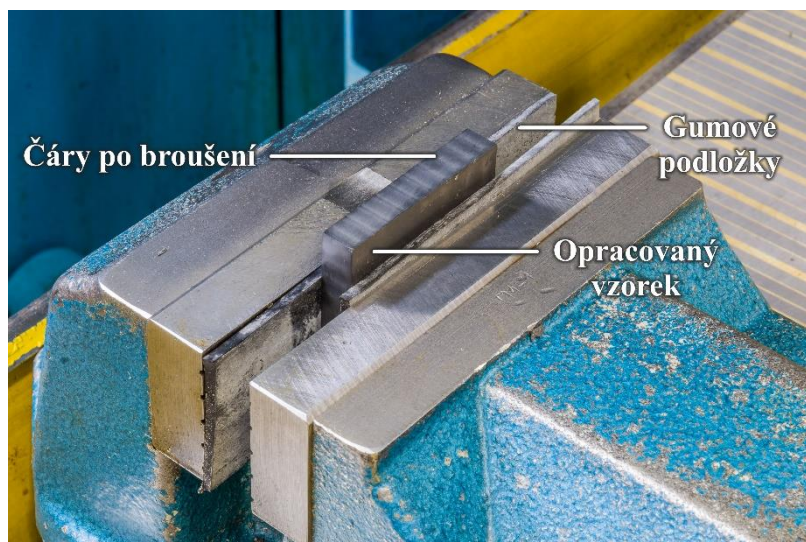
Z důvodu křehkého charakteru obráběného materiálu došlo při upnutí testovacího vzorku do svěráku k jeho prasknutí, a to opakovaně, viz Obr. 4.7.



Obr. 4.7 Porušení vzorku v důsledku nedokonalého upnutí do svěráku

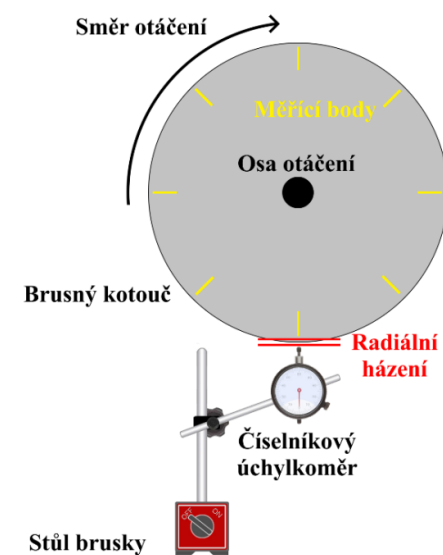
Pravděpodobnou příčinou byly nedokonalé upínací plochy svěráku, jejichž nedostatečná vzájemná rovnoběžnost a tím vznikající napětí způsobily destrukci křehkého keramického vzorku. Proto byly pro upnutí použity tvrdé gumové podložky, které kompenzovaly nerovnoměrný tlak svěráku a umožnily tak pevné upnutí vzorků. Testovací broušení potvrdilo korektní zapojení měřicí aparatury, každý z měřicích kanálů stahoval hodnoty podle nastavených parametrů. Hodnoty dosahovaly očekávané úrovně.

Po testovacím broušení zůstaly na povrchu vzorku okem viditelné pravidelné čáry (Obr. 4.8), které naznačovaly nestabilitu v procesu.



Obr. 4.8 Povrch vzorku po testovacím broušení

Jako první bylo pomocí číselníkového úchylkoměru ověřeno radiální házení brouscího kotouče. Princip měření je vyobrazen na Obr. 4.9. Po přiložení měřicího dotyku k povrchu brouscího kotouče byl zaznamenán aktuální údaj z číselníku. Při každém pootočení kotouče byla sledována změna údaje. Celkem bylo realizováno 8 měření, rovnoměrně rozložených po obvodu kotouče - každých 45°. Míra házení byla pod rozlišením úchylkoměru. Měření prokázalo správné a dostatečně centrické osazení brouscího kotouče, stejně jako jeho dostatečnou ovalitu a vyloučilo brouscí kotouč, nebo jeho uložení, jako primární zdroj chyby.



Obr. 4.9 Schéma principu ověření tvaru brouscího kotouče

Na základě výše uvedeného bylo zřejmé, že na přesné určení příčiny výskytu pravidelných čar je třeba realizovat větší množství pozorování a následně analyzovat získaná data. Tím byl rozšířen záměr experimentu nad rámec původního cíle. Celkem bylo testováno 24 kombinací řezných podmínek. Přiřazené označení jednotlivých vzorků je

uvedeno v *Tab. 4.10*. Jejich vliv na výskyt opakujících se čar a kvalitu broušeného povrchu je podrobně analyzován v samostatných podkapitolách, pokaždé pozorováním jiné fyzikální veličiny. Ověření výstupů z analýzy a identifikace zdroje chyb bylo validováno opakovaným experimentem. Jeho popisu a výstupům je věnována závěrečná část této kapitoly.

Tab. 4.10 A - Označení vzorků podle kombinace řezných podmínek

Řezná rychlost v_c [m/s]	Posuvová rychlost v_f [m/min]	Hloubka řezu a_e [mm]	Označení vzorku
23,1	6,25	0,01	1A_vc1_vf1_a1
		0,03	1A_vc1_vf1_a2
		0,05	1A_vc1_vf1_a3
		0,07	1A_vc1_vf1_a4
	11,39	0,01	4A_vc1_vf2_a1
		0,03	4A_vc1_vf2_a2
		0,05	4A_vc1_vf2_a3
		0,07	4A_vc1_vf2_a4
	16,84	0,01	7A_vc1_vf3_a1
		0,03	7A_vc1_vf3_a2
		0,05	7A_vc1_vf3_a3
		0,07	7A_vc1_vf3_a4
30,4	6,25	0,01	1A_vc2_vf1_a1
		0,03	1A_vc2_vf1_a2
		0,05	1A_vc2_vf1_a3
		0,07	1A_vc2_vf1_a4
	11,39	0,01	4A_vc2_vf2_a1
		0,03	4A_vc2_vf2_a2
		0,05	4A_vc2_vf2_a3
		0,07	4A_vc2_vf2_a4
	16,84	0,01	7A_vc2_vf3_a1
		0,03	7A_vc2_vf3_a2
		0,05	7A_vc2_vf3_a3
		0,07	7A_vc2_vf3_a4

4.3 Výsledky experimentů

4.3.1 Analýza silového zatížení

Výstupem z měření dynamometrem je textový soubor obsahující pole hodnot

okamžitého silového působení v čase, a to zvlášť pro každý měřicí kanál. Pomocí tříosého dynamometru bylo pozorováno působení složek řezné síly - tangenciální, axiální a normálové (*Obr. 3.15* - pozn.: popsány v teoretické části). Výsledky byly zpracovány pomocí programu MS Excel do podoby grafické závislosti síly na čase. Jelikož nebyl moment broušení žádným způsobem synchronizován se záznamem dynamometru, bylo nezbytné vyhledat platná data pro vyhodnocení ručně a omezit tak pole hodnot pro další zpracování pouze na vybraná data. Následně byly z grafů odečteny číselné hodnoty popisující silové působení v procesu broušení.

Na vyjádření silového zatížení byla použita měrná řezná síla, která je vztažena na 1mm šířky broušení. Získané výsledky z dynamometru proto byly poděleny tloušťkou vzorků (brousicí kotouč měl tloušťku 10mm, vzorky měly tloušťku 8,5mm, přičemž vzorek byl vždy přebroušen celou plochou kotouče bez příčného posuvu stolu brusky). V grafech jsou proto uváděny hodnoty v jednotce N.mm^{-1} .

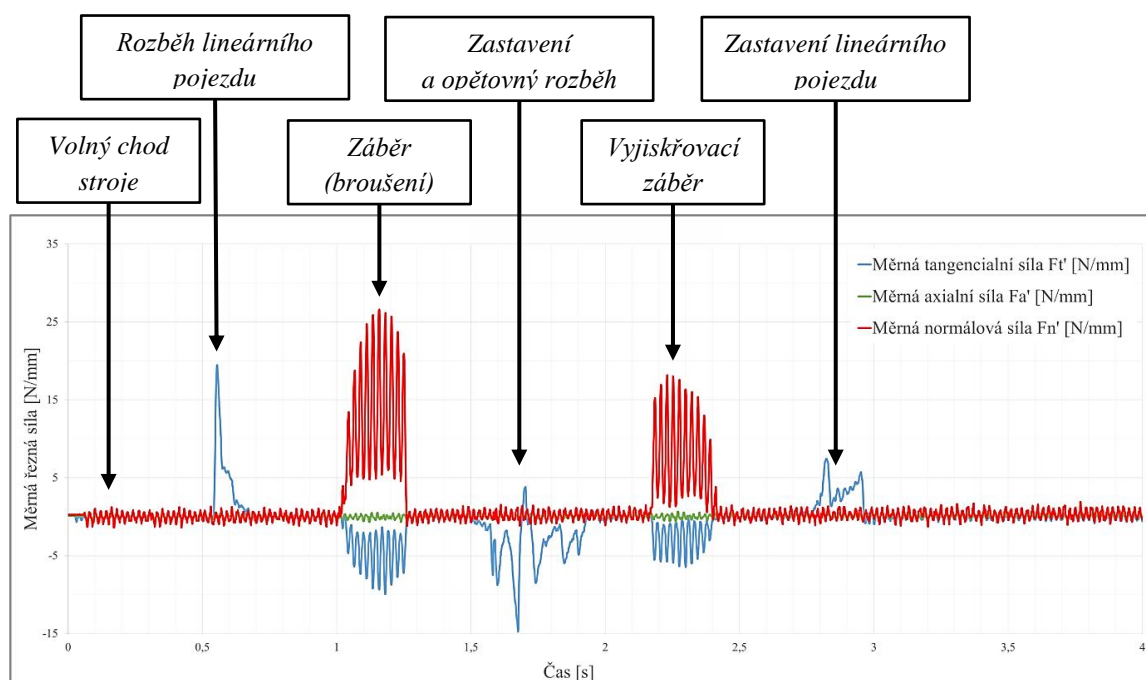
Následně byl na data aplikován plovoucí mediánový filtr šířky 3. Tím byly z dat odstraněny jednotlivé náhodné a nespojité hodnoty, které negativně ovlivňovaly zejména absolutní hodnoty výsledků. Tímto způsobem ale nebyla dotčena hodnota plynule se měnících dat, ani jejich frekvence. Dále bylo realizováno "nulování" signálu, pro každý měřicí kanál a pro každý vzorek zvlášť. Pod pojmem "nulování" rozumíme nastavení kompenzace signálu z dynamometru tak, aby v čase bez působení vnějších sil, byla indikována síla nulová. Hodnota kompenzace byla stanovena z první půl-sekundy záznamu, kdy bruska běžela naprázdno. Z uvedeného intervalu byla určena střední hodnota signálu a následně byla realizována samotná kompenzace jednoduchým posunutím celého pole dat o zjištěnou střední hodnotu.

Mezi hodnocené parametry působící řezné síly byla zařazena střední, minimální a maximální hodnota a z nich vypočtený celkový rozsah působící síly. Jmenované parametry byly doplněny o frekvenci působící síly. Ta byla z vybraných dat získána jejich transformací z časové do frekvenční oblasti pomocí DFT (Diskrétní Fourierova transformace). Tuto možnost MS Excel nabízí v rámci přídatného modulu *Analysis ToolPack* pod funkcí *Data Analysis*. Jeho nevýhodou je nižší míra možné automatizace (zpracovávané pole dat, výstupní pole dat i spuštění samotného výpočtu je nutné zadávat ručně, plná automatizace výpočtu je možná pouze při použití VBA skriptu) a dlouhý čas samotného výpočtu (řádově minuty na jeden vzorek). Kvůli použitému algoritmu je možné analyzovat pouze konkrétní počet vzorků, a to pole délky 2^n , přičemž maximální hodnota je $n = 12$, tedy 4096 vzorků. Při analýze frekvenčního spektra dat z dynamometru byly nejčastěji použity hodnoty $n = 9$, tedy 512 vzorků, $n = 8$, tedy 256 vzorků a v některých případech i $n = 7$, tedy 128 vzorků. Zvolený počet vzorků ovlivňovala délka samotného broušení. Tím se měnila i přesnost výpočtu DFT, respektive její rozlišení. To je vždy uvedeno u všech výsledků. Výstupem Fourierovy transformace aplikované na vstupní pole reálných diskrétních čísel je pole komplexních čísel, které jsou hermitovsky symetrické, a to přesně kolem střední frekvence z rozsahu [122]. Při dodržení Shannon-Nyquistova vzorkovacího teorému je pak možné správně vyhodnotit maximálně frekvenci rovnou

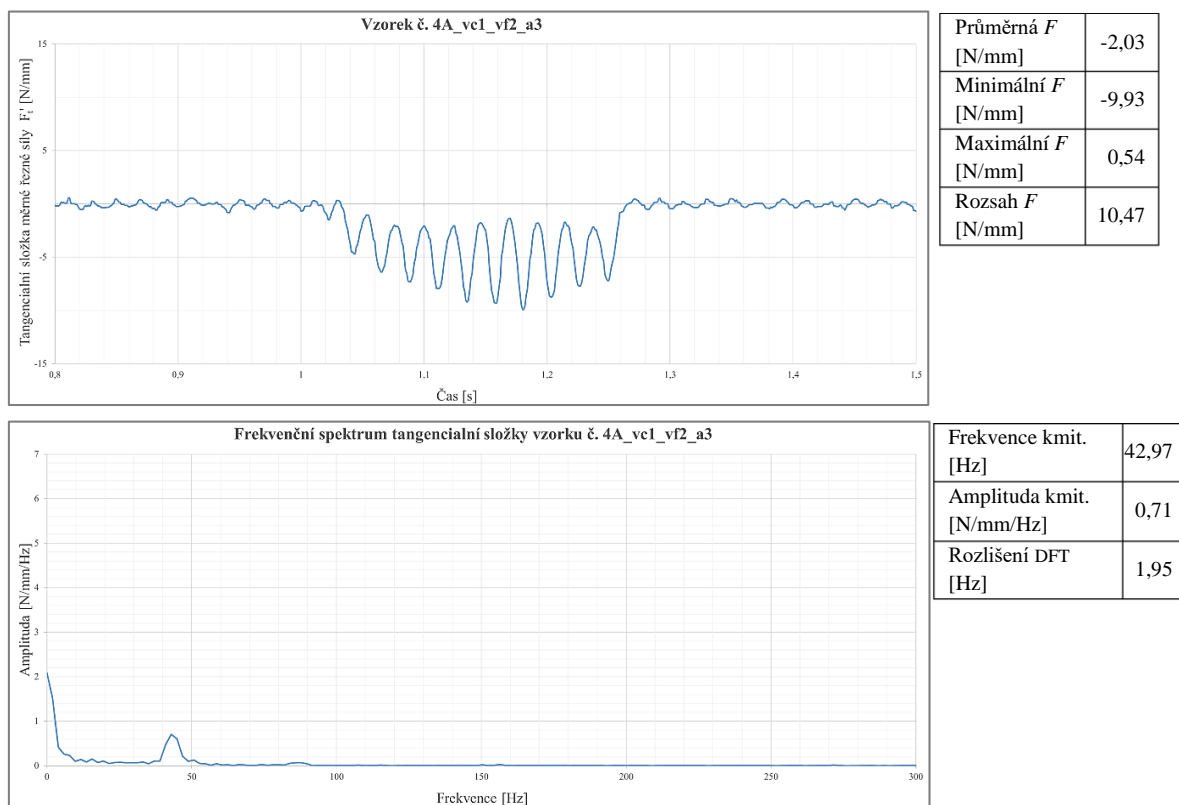
polovině vzorkovací frekvence. Na tento fakt je nutné při dalším zpracování dat myslet, protože MS Excel není nástrojem primárně určeným na takový typ analýz a generuje proto i výsledky, které jsou neskutečné (nad polovinou vzorkovací frekvence jsou zrcadlovým obrazem spodní poloviny), i když z pohledu matematiky jsou v pořádku. Jelikož dynamometr byl nastaven na rychlost vzorkování 1000 Hz, je možné spolehlivě vyhodnotit jen frekvence pod 500 Hz. Rychlostí své odezvy není dynamometr určený k měření vysokých frekvencí, proto budou přesnější výsledky vibrací experimentální sestavy primárně vyhodnoceny z akcelerometru v následující kapitole. Z vypočteného pole komplexních čísel je nutné dalším zpracováním získat hodnotu amplitudy signálu (reálná část čísla) a příslušnou frekvenci. Takto zpracovaný signál je možné vynést do grafu jako závislost velikosti signálu řezné síly, tedy její amplitudy na frekvenci.

Všechny grafy používají fixní hodnotu Y osy, aby bylo možné snadno identifikovat velikost působících sil. X-ové hodnoty jsou vždy přizpůsobeny konkrétnímu vzorku, aby v plném rozlišení zobrazovaly zaznamenaný průběh řezné síly v momentě broušení. Každý záznam z dynamometru obsahuje stejný počet údajů, konkrétně 4000. Spuštění záznamu proběhlo manuálně, stejně jako spuštění procesu broušení. Proto nastal moment záběru, který je předmětem pozorování, vždy v jiném okamžiku. Na *Obr. 4.10* jsou popsány jednotlivé etapy procesu broušení, demonstrovány na vzorku 4A_vc1_vf2_a3. Zobrazeny jsou všechny působící složky řezné síly, jejich časový výskyt i vzájemný poměr jejich velikostí.

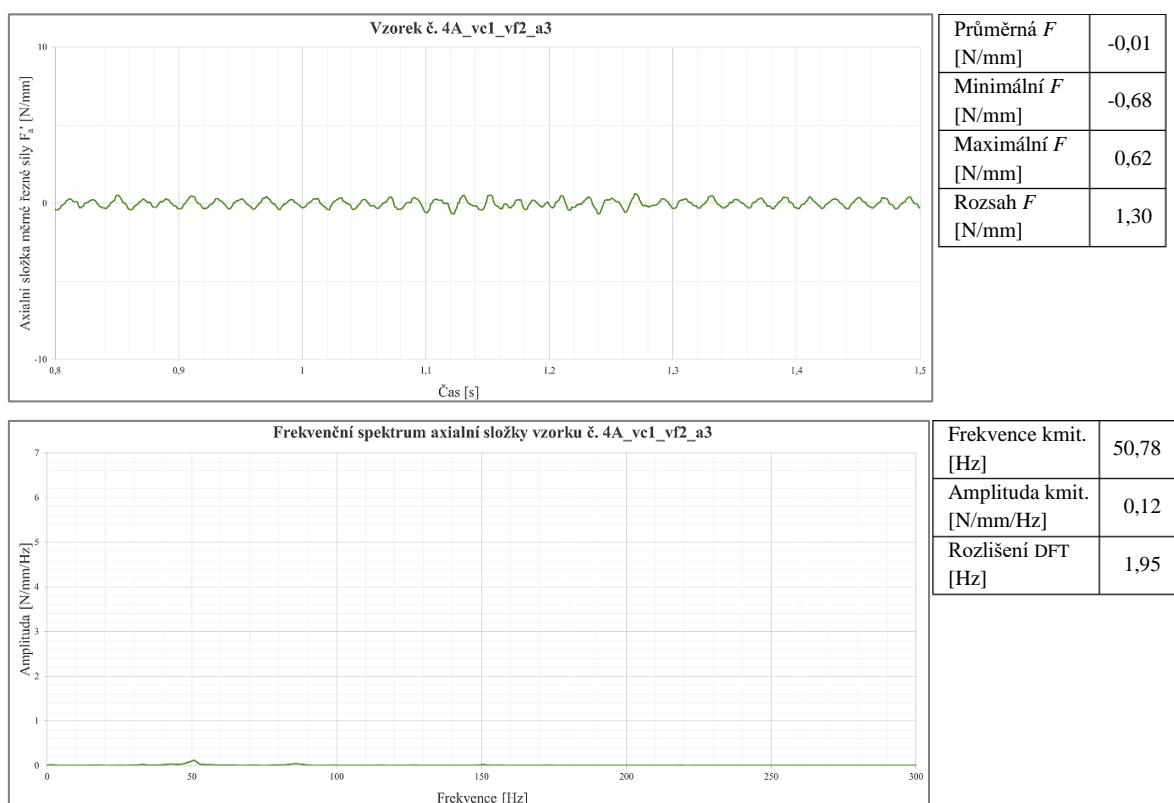
Dále jsou na obrázcích *Obr. 4.11* - *Obr. 4.13* detailně zobrazeny jednotlivé složky řezné síly samostatně v časové i frekvenční oblasti.



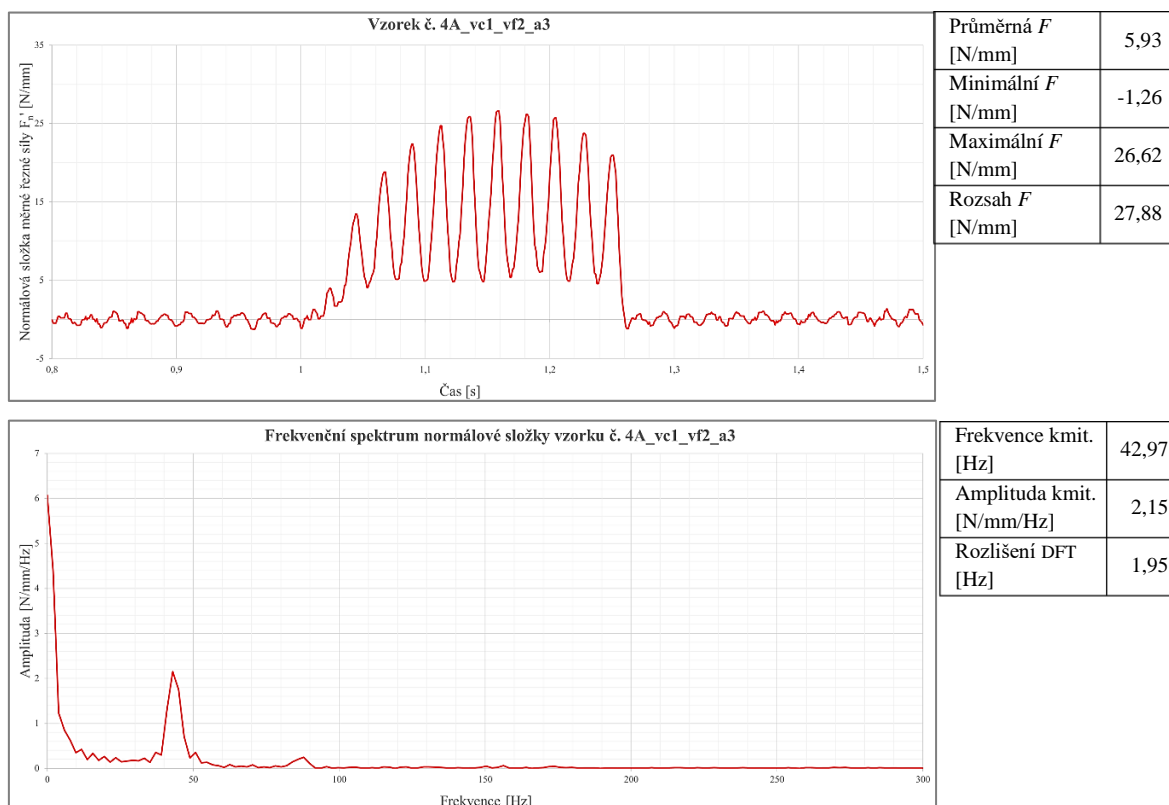
Obr. 4.10 Popis jednotlivých etap broušení



Obr. 4.11 Tangenciální složka měrné řezné síly v časové a frekvenční oblasti



Obr. 4.12 Axiální složka měrné řezné síly v časové a frekvenční oblasti



Obr. 4.13 Normálová složka měrné řezné síly v časové a frekvenční oblasti

Ze zobrazených průběhů je zřejmý periodický charakter působící řezné síly s velkou amplitudou kmitání. Při všech zkoumaných vzorcích platí vztah:

$$F_{nr} > F_{tr} \gg F_{ar}$$

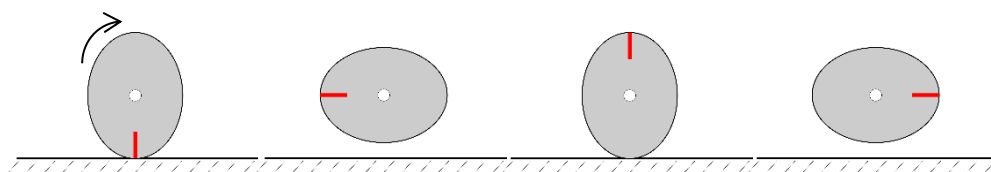
přičemž z uvedených grafů na obrázku Obr. 4.12 je zřejmé, že působení axiální složky řezné síly je prakticky nulové, proto s analýzou a zpracováním této složky nebudeme dále zabývat. Měřením bylo dokázáno, že se jedná o pasivní složku řezné síly a současně byla tato složka řezné síly vyloučena jako možný zdroj chyby. Stejný charakter vykazovaly všechny testované vzorky.

Z frekvenčního spektra tangenciální složky měřené řezné síly F_t byla určena frekvence kmitání rovnající se 42,97 Hz při frekvenčním rozlišení na úrovni 1,95 Hz. Neceločíselný násobek frekvenčního rozlišení vzhledem k výsledné frekvenci kmitání byl způsoben chybou zaokrouhlení. Stejná frekvence kmitání byla určena i pro normálovou složku měřené řezné síly F_n . Pro pozorovaný vzorek 4A_vc1_vf2_a3 byla otáčková frekvence f_{s1} [Hz] brousicího kotouče daná vztahem (4.1) rovna 42,03 Hz.

$$f_{s1} = \frac{n_{s1}}{60} = \frac{2522 \text{ min}^{-1}}{60} = 42,03 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

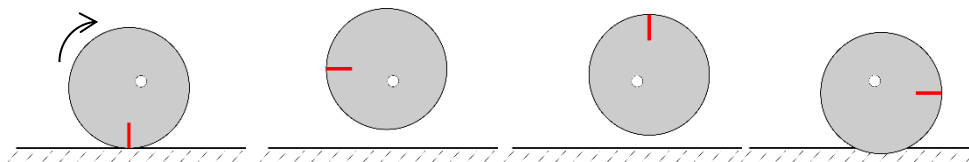
Podobnost frekvence kmitání řezné síly s otáčkovou frekvencí nástroje naznačuje, že původcem vibrací je samotný nástroj, nebo jeho uložení. Rozdíl přibližně 1 Hz mezi očekávanou a naměřenou frekvencí může být způsoben slabým rozlišením frekvenční analýzy, která je daná vzorkovacím kmitočtem dynamometru a počtem vzorků, které byly použity pro výpočet DFT.

Při chybě tvaru brousicího kotouče (válcovitost) a dokonale centrickém uložení, jak je znázorněno na *Obr. 4.14*, je frekvence kmitání rovna dvojnásobku otáčkové frekvence. Proto je logické předpokládat, že válcovitost brousicího kotouče byla dostatečná a nebyla hlavním zdrojem chyby. Toto tvrzení podporuje měření pomocí číselníkového úchylkoměru z úvodu kapitoly.



Obr. 4.14 Schématické znázornění vlivu válcovitosti na frekvenci kmitů

Frekvenci kmitání rovnou otáčkové frekvenci může generovat i nedostatečně centrické upnutí brousicího kotouče, tedy házení. Vliv házení je zachycen na *Obr. 4.15*. Amplituda generovaných kmitů by musela lineárně stoupat se zvětšujícím se záběrem brousicího kotouče. Tato skutečnost je na testovaných vzorcích pozorována jen částečně, jak bude ukázáno dále.

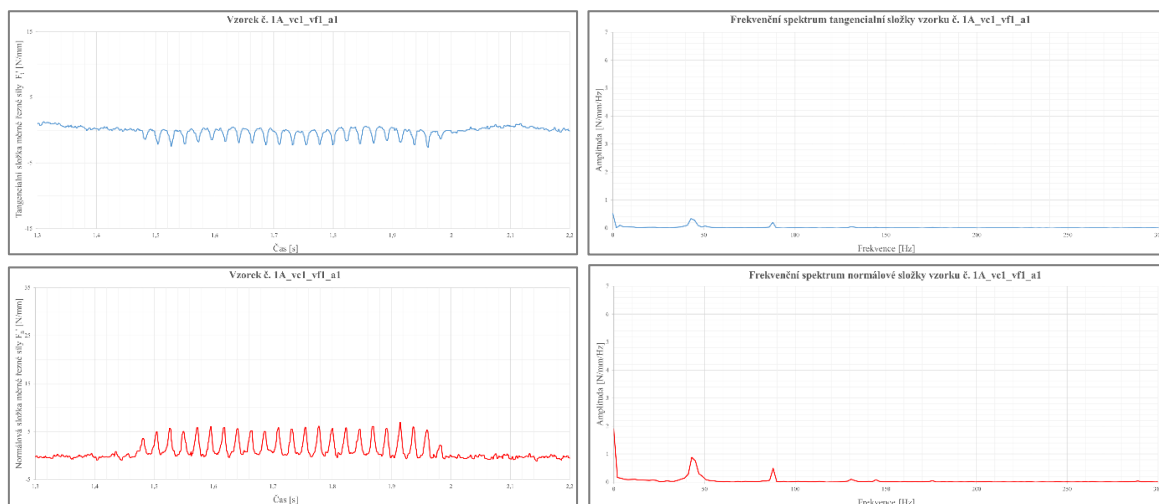


Obr. 4.15 Schématické znázornění vlivu házení na frekvenci kmitů

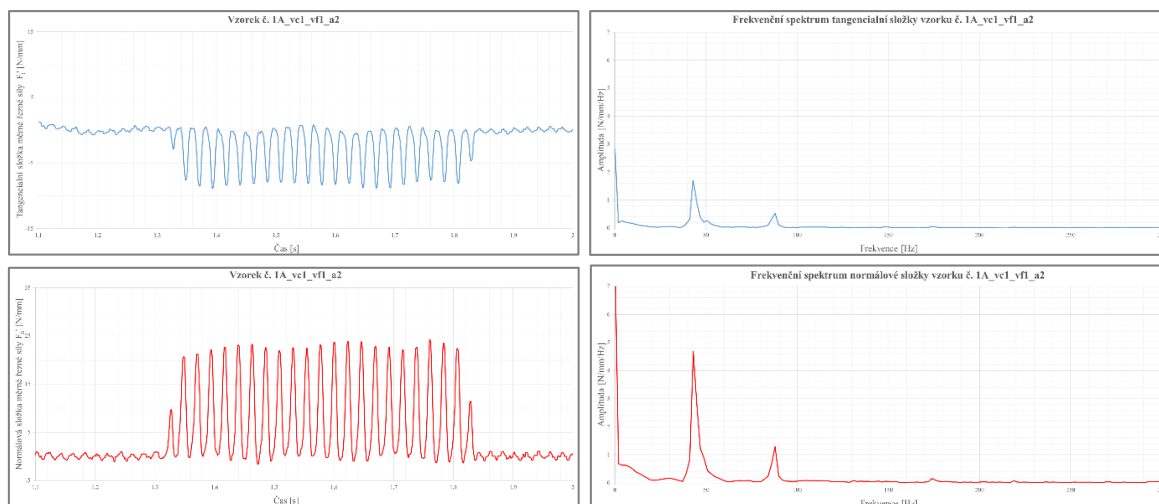
Stále platí, že mechanickým měřením házení brousicího kotouče při testovacím broušení pomocí číselníkového úchylkoměru nebyla přítomnost závažného házení kotouče prokázána. Z projevů silového působení na proces broušení však nemůže být jednoznačně vyloučena.

Vliv hloubky záběru na silové zatížení

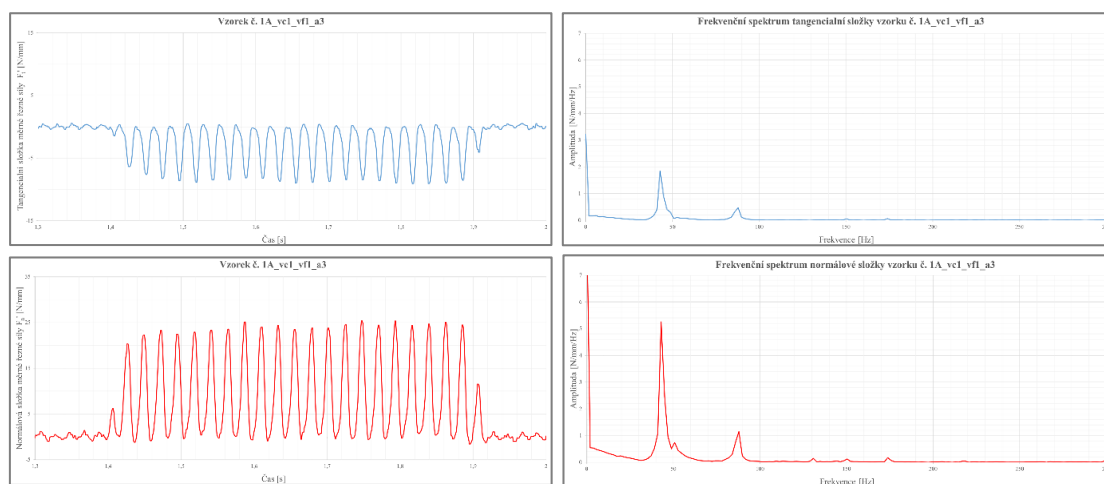
Na obrázcích *Obr. 4.16* až *Obr. 4.19* je zobrazen průběh jednotlivých složek řezné síly při změně hloubky pracovního záběru a_{e1} až a_{e4} na vzorku **1A_vc1_vf1** ($v_{c1} = 23,1$ m/s, $v_{f1} = 6,25$ m/min).



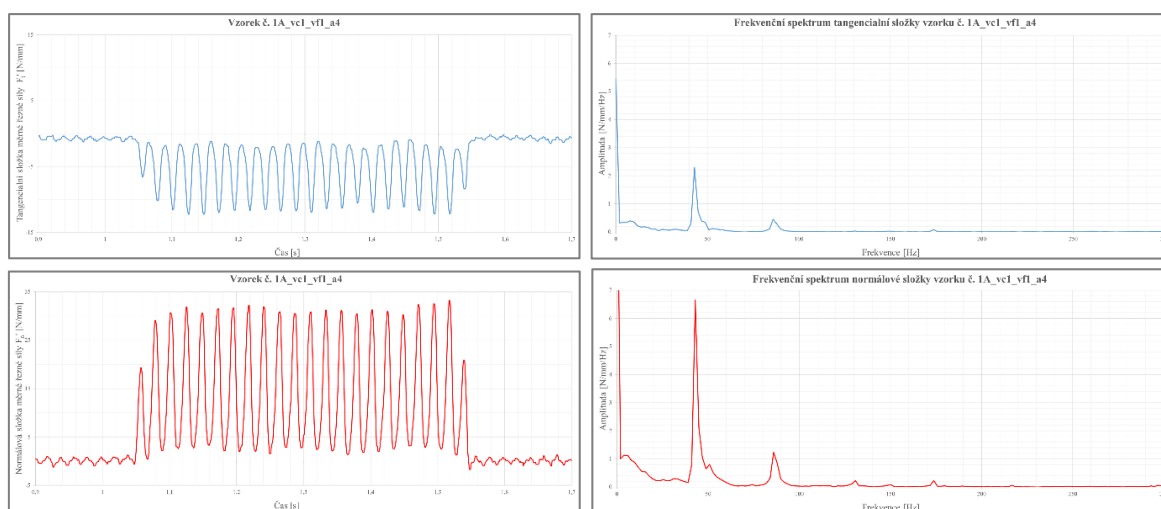
Obr. 4.16 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e1} = 0.01 \text{ mm}$ - vzorek 1A_vc1_vf1



Obr. 4.17 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e2} = 0.03 \text{ mm}$ - vzorek 1A_vc1_vf1



Obr. 4.18 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e3}=0,05$ mm - vzorek 1A_vc1_vf1



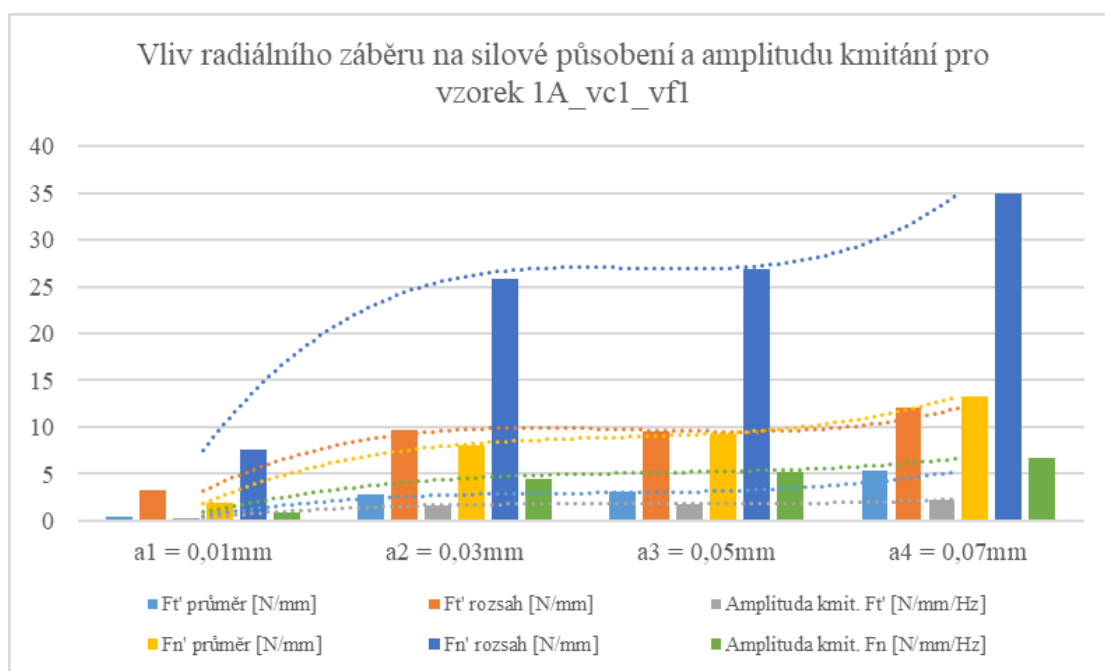
Obr. 4.19 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e3}=0,07$ mm - vzorek 1A_vc1_vf1

Číselné vyjádření velikosti působící složky řezné síly, frekvence zaznamenaného kmitání a její příslušející amplitudy je v

Tab. 4.11. Odpovídající graf je na Obr. 4.20.

Tab. 4.11 Hodnoty řezné síly, frekvence a amplitudy frekvence při změně záběru-vzorek 1A

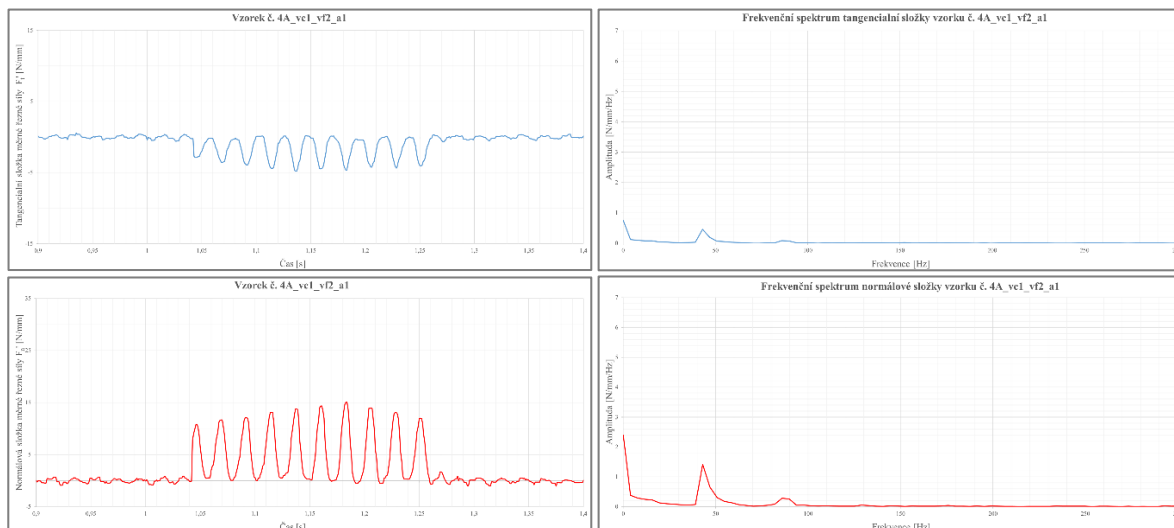
	a1 = 0,01mm	a2 = 0,03mm	a3 = 0,05mm	a4 = 0,07mm
$F_{t'}$ průměr [N/mm]	0,5	2,78	3,14	5,32
$F_{t'}$ rozsah [N/mm]	3,22	9,69	9,55	12,05
Amplituda kmit. $F_{t'}$ [N/mm/Hz]	0,34	1,7	1,84	2,3
$F_{n'}$ průměr [N/mm]	1,86	8,09	9,26	13,34
$F_{n'}$ rozsah [N/mm]	7,59	25,9	26,93	34,93
Amplituda kmit. $F_{n'}$ [N/mm/Hz]	0,886	4,48	5,25	6,65
Frekvence kmitání $F_{t'}$ [Hz]	42,97	42,97	42,97	42,97
Frekvence kmitání $F_{n'}$ [Hz]	42,97	42,97	42,97	42,97



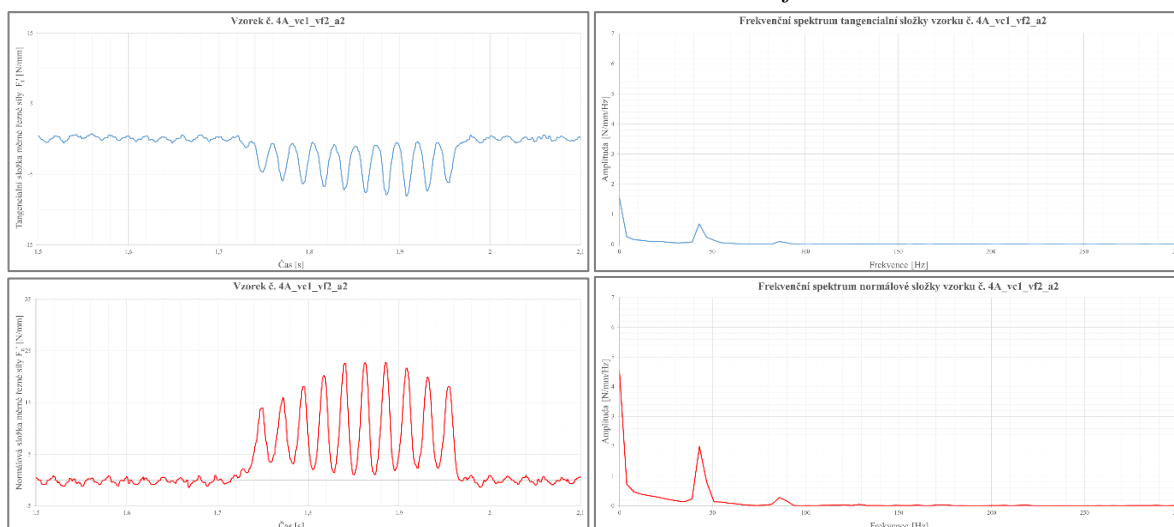
Obr. 4.20 Vliv radiálního záběru na silové působení a amplitudu kmitání vzorek 1A_vc1_vf1

Ze získaných dat pozorujeme rostoucí charakter působící síly se zvětšujícím se radiálním záběrem broušícího kotouče. Závislost ale není dostatečně lineární na to, aby nevyvratitelně potvrdila házení broušícího kotouče. Na dalších vzorcích je možné vidět obdobně rostoucí charakter, přičemž od jisté velikosti záběru (většinou 0,03 mm) roste jen průměrná hodnota působící síly, nikoli amplituda kmitů. Dochází k "nasycení" kmitání

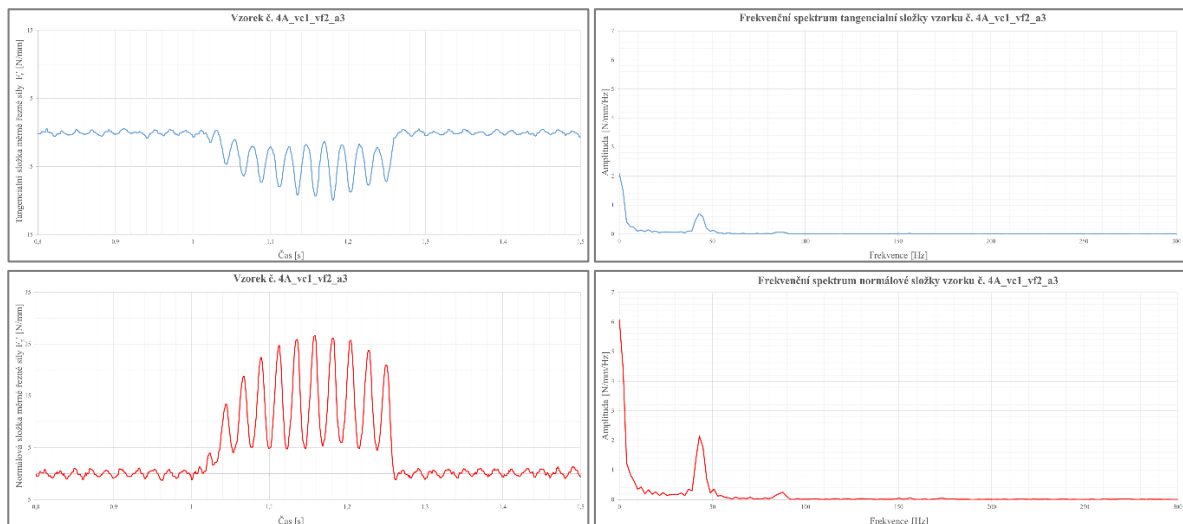
řezné síly. Tento fakt dokazují průběhy jednotlivých složek řezné síly při změně hloubky pracovního záběru a_{e1} až a_{e4} na vzorku **4A_vc1_vf2** ($v_{c1} = 23,1$ m/s, $v_{f2} = 11,39$ m/min) na obrázcích *Obr. 4.21* až *Obr. 4.24*. Ve všech uvedených případech zůstává frekvence kmitání neměnná, velmi blízká otáčkové frekvenci brousicího kotouče.



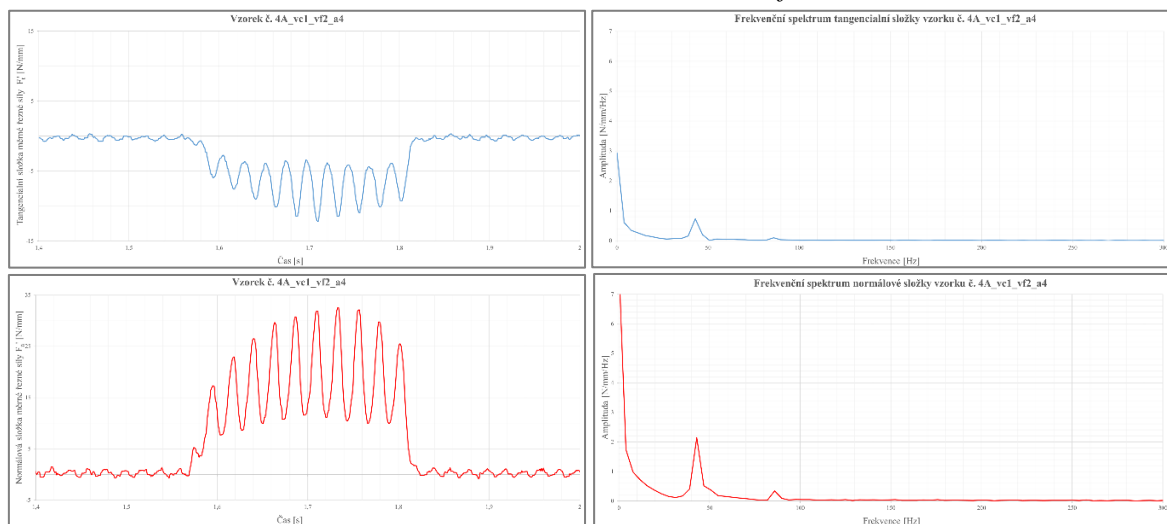
Obr. 4.21 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e1}=0,01$ mm - vzorek 4A_vc1_vf2



Obr. 4.22 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e2}=0,03$ mm - vzorek 4A_vc1_vf2



Obr. 4.23 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e3}=0,05 \text{ mm}$ - vzorek 4A_vc1_vf2

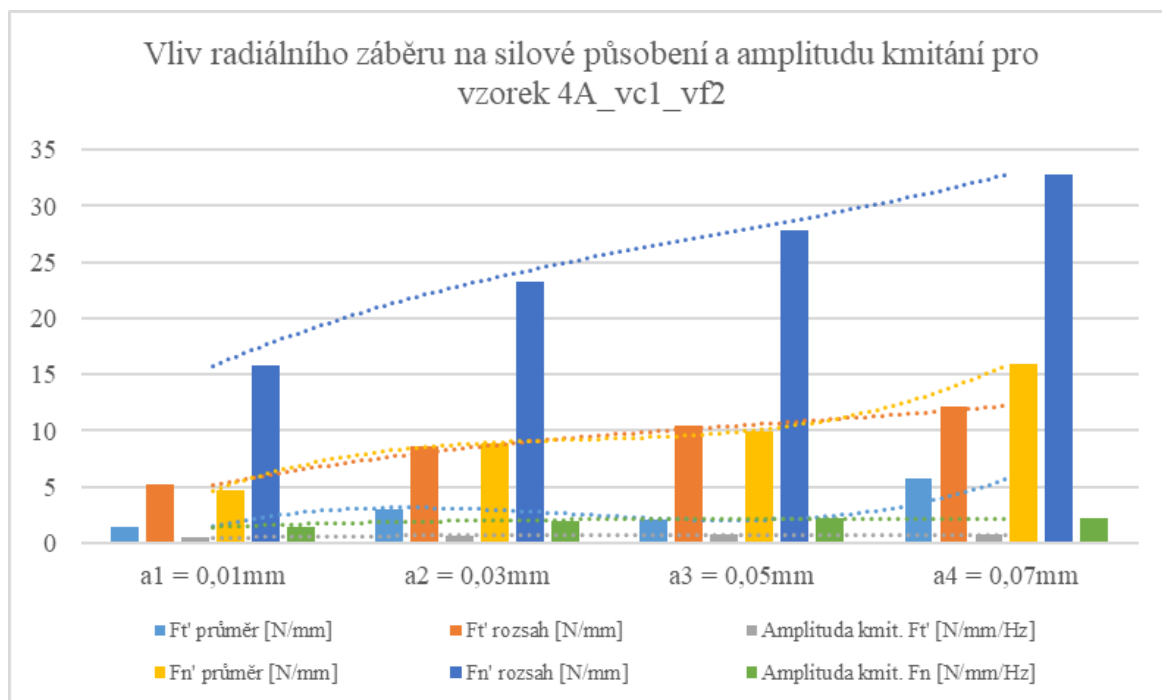


Obr. 4.24 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e3}=0,07 \text{ mm}$ - vzorek 4A_vc1_vf2

Číselné vyjádření velikosti působící složky řezné síly, frekvence zaznamenaného kmitání a její příslušející amplitudy je v Tab. 4.12. Odpovídající graf je na Obr. 4.25 Obr. 4.20.

Tab. 4.12 Hodnoty řezné síly, frekvence a amplitudy frekvence při změně záběru-vzorek 4A

	$a1 = 0,01\text{mm}$	$a2 = 0,03\text{mm}$	$a3 = 0,05\text{mm}$	$a4 = 0,07\text{mm}$
$F_{t'}$ průměr [N/mm]	1,48	3,01	2,03	5,72
$F_{t'}$ rozsah [N/mm]	5,17	8,56	10,47	12,2
Amplituda kmit. $F_{t'}$ [N/mm/Hz]	0,46	0,68	0,71	0,73
$F_{n'}$ průměr [N/mm]	4,68	8,87	9,93	15,87
$F_{n'}$ rozsah [N/mm]	15,76	23,26	27,88	32,8
Amplituda kmit. $F_{n'}$ [N/mm/Hz]	1,42	1,99	2,15	2,15
Frekvence kmitání $F_{t'}$ [Hz]	42,97	42,97	42,97	42,97
Frekvence kmitání $F_{n'}$ [Hz]	42,97	42,97	42,97	42,97



Obr. 4.25 Vliv radiálního záběru na silové působení a amplitudu kmitání – 4A_vc1_vf2

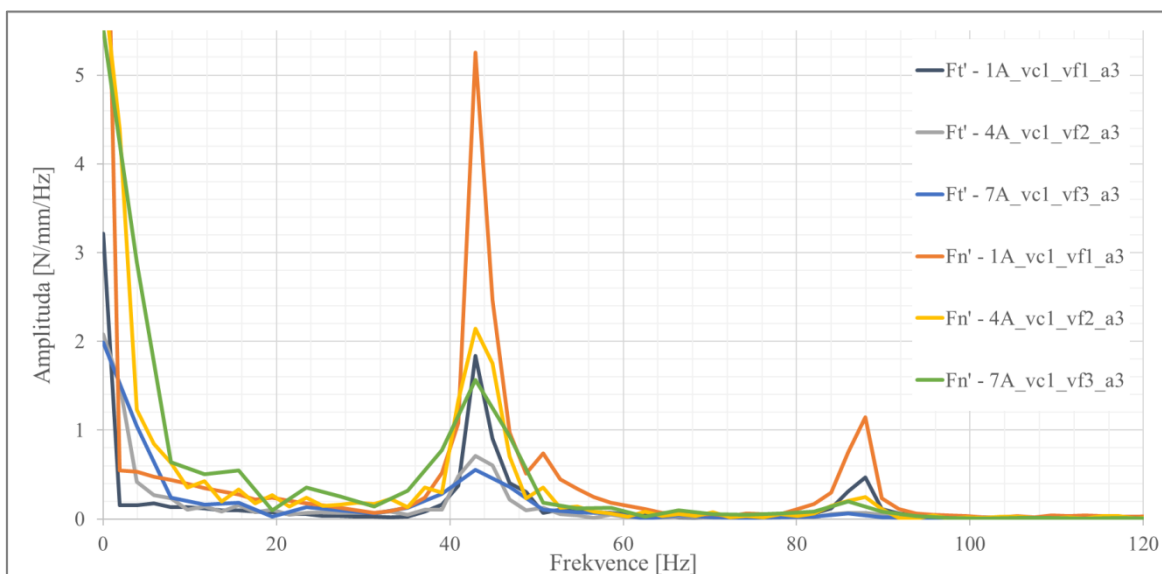
Vliv řezné a posuvové rychlosti na silové zatížení

Ze získaných průběhů působící řezné síly je ve všech případech zjevné, že v procesu broušení se vyskytuje systematický problém, jehož primárním projevem je kmitání. To způsobuje na povrchu broušených vzorků periodicky se opakující čáry a tím povrch, respektive celý vzorek kvalitativně znehodnocuje. Vliv posuvové rychlosti a řezné rychlosti na frekvenci a amplitudě předmětného kmitání zachycuje sumární graf na Obr. 4.26 zobrazující frekvenční spektrum řezných sil a z něj odvozený graf na Obr. 4.28. Ve všech případech byl radiální záběr neměnný, nastavený na hodnotu $a_{e3} = 0,05$ mm.

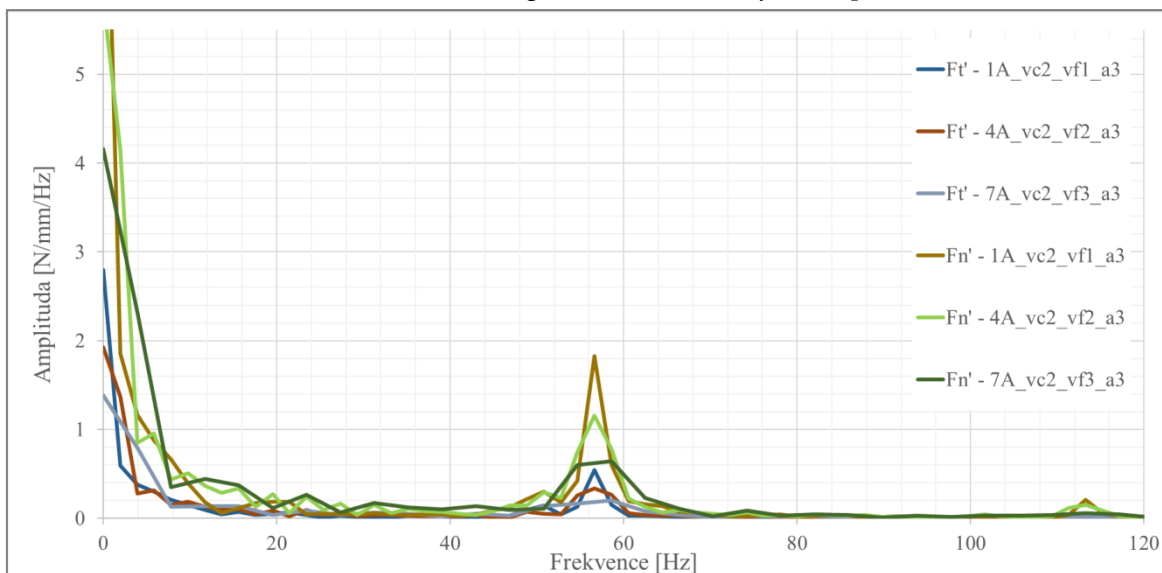
Z obrázku Obr. 4.26 je vidět, že existují dvě základní frekvence kmitání, přímo závislé na otáčkové frekvenci nástroje. Z výpočtů vyšlo, že pro první řeznou rychlost $v_{c1} = 23,1$ $m \cdot s^{-1}$ je frekvence kmitání při všech vzorcích rovná 42,97 Hz, pro druhou řeznou rychlost $v_{c2} = 30,4$ $m \cdot s^{-1}$ je frekvence kmitání při dvou vzorcích rovná 56,64 Hz a při jednom vzorku 58,59 Hz (viz také Obr. 4.28). Rozdíl zaznamenané frekvence lze připsat malému rozlišení DFT při analýze vzorku 7A_vc2_vf3_a3, která z důvodu krátkého trvání broušení obsahovala pouze 256 bodů a tomu příslušné rozlišení na úrovni 3,91 Hz. Při lepším rozlišení lze očekávat hodnotu frekvence kmitání identickou s ostatními vzorky, tedy 56,64 Hz. Získanou frekvenci kmitání můžeme označit jako nosnou nebo 1. harmonickou.

Z úhrnného průběhu spektra řezných sil (Obr. 4.26) je dobře viditelný i vliv kmitů na dvojnásobku nosné frekvence, tedy 2. harmonické. Pro řeznou rychlost v_{c1} je to zaznamenaná hodnota 87,89 Hz, pro řeznou rychlost v_{c2} je to hodnota 113,28 Hz. Odchyly ve frekvencích ($2 \times 42,97 \neq 87,89$) jsou opět způsobeny nedostatečným rozlišením DFT a kumulativní chybou zaokrouhlování. Vliv vyšších harmonických je ale

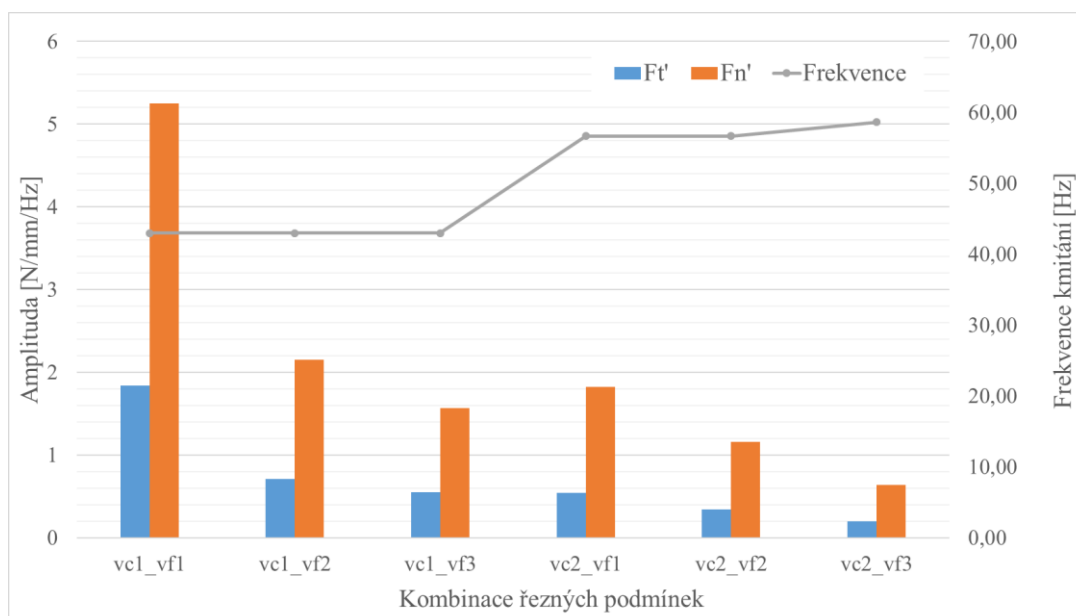
v tuto chvíli minoritní, představuje maximálně 22% úrovně nosné frekvence.



Obr. 4.26 Frekvenční spektra složek řezných sil pro v_{c1}



Obr. 4.27 Frekvenční spektra složek řezných sil pro v_{c2}



Obr. 4.28 Vliv posuvové a řezné rychlosti na silové působení a amplitudu kmitání

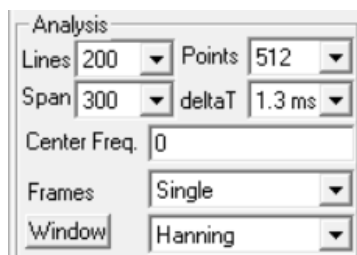
Zpracováním hodnot frekvence a amplitudy kmitání pro složky řezné síly F_t' a F_n' při konstantní hodnotě radiálního záběru byl získán graf na Obr. 4.28, který dokazuje, že frekvence kmitání je přímo úměrná řezné rychlosti a že amplituda kmitání je nepřímo úměrná posuvové rychlosti. Stejně nepřímo úměrný je i vztah mezi řeznou rychlostí a amplitudou kmitání. Z uvedeného tvrzení plyne, že čím vyšší jsou řezné rychlosti (otáčková rychlost nástroje a rychlost lineárního posunu stolu brusky), a čím menší je radiální záběr, tím je intenzita problematického kmitání menší. Z analýzy silového působení v procesu broušení ale není možné jednoznačně identifikovat zdroj kmitání a navrhnout adekvátní opatření na jeho eliminaci. K jeho přesné lokalizaci budou využity zejména výstupy z měření vibrací v následující kapitole.

4.3.2 Vibrační analýza

Obdobně jako při měření působících řezných sil, tak ani při měření vibrací nebyl moment broušení žádným způsobem synchronizován se záznamem signálového analyzátoru. Proto bylo nezbytné vyhledat platná data pro vyhodnocení ručně a omezit tak pole hodnot pro další zpracování pouze na vybraná data. Pozorováno bylo zejména výkonové spektrum signálu, křížové spektrum mezi signály a dráha jednotlivých měřicích kanálů (směrů působení). Vzorkovací frekvence byla nastavena na maximální rozsah použitého akcelerometru, tedy 10 kHz.

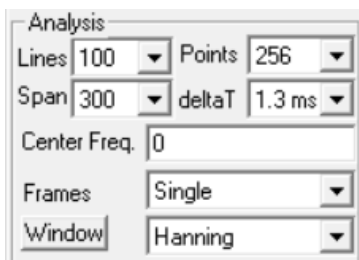
Vzhledem k výskytu příčných čar po broušení na povrchu vzorků a poznatků z analýzy silového působení byla jako primární oblast zájmu určena nízkofrekvenční část spektra, konkrétně do 300 Hz. Největší energie vibrací byla očekávána na úrovni otáčkové frekvence broušícího kotouče, tedy **42,03 Hz** pro řeznou rychlost v_{c1} a **55,32 Hz** pro řeznou rychlost v_{c2} . Tomuto faktu musely být přizpůsobeny parametry analýzy, zejména frekvenční rozpětí (Span), tomu odpovídající vzorkovací interval (ΔT) a počet bodů (Points), které vstupovaly do analýzy. Pro většinu vyhodnocovaných vzorků bylo

optimální nastavení zachyceno na *Obr. 4.29*. Opět platí, že použitý algoritmus Fourierovy analýzy vyžaduje počet bodů (vzorků) rovný 2^n , kde $n \leq 18$.



Obr. 4.29 Optimální parametry Fourierovy transformace pro vzorky s nižší posuvovou rychlostí v_{f1} a v_{f2}

Obecný předpoklad spektrální analýzy pomocí FFT říká, že vstupní signál (záznam) je v čase nekonečný. V takovém případě je možné spolehlivě vyhodnotit každou frekvenci od 0 Hz až po polovinu vzorkovací frekvence. V praxi jsou zpracovávány pouze signály konečné délky trvání. V tomto případě byl zajímavý jen moment samotného broušení, jehož průměrná doba trvání byla jen několik desetin sekundy, v závislosti na aktuálních řezných podmínkách. To výrazně limitovalo přesnost analýzy a její rozlišení právě na nízkých frekvencích. Nebylo totiž možné použít do výpočtu FFT velký počet bodů a zároveň dlouhý vzorkovací interval. Nejlepší reálně dosažené rozlišení analýzy proto bylo jen 1,46 Hz. Při nastavení delšího vzorkovacího intervalu, nebo většího počtu bodů (obojí by vedlo k lepšímu rozlišení) se moment samotného broušení "ztrácel" ve volném chodu stroje a výkonová složka frekvencí, příslušejících pouze záběru, se snižovala. Tím klesal i reálný odstup užitečného signálu a šumu a ztrácela se přesnost lokalizace. Pro nejvyšší testované řezné a posuvové rychlosti bylo dosaženo rozlišení pouze 2,93 Hz při rozsahu 300 Hz. Doba broušení byla v tomto případě dlouhá méně než 0,2 s. Na FFT analýzu bylo použito pouze 256 bodů, což je nejnižší dostupná volba. Parametry analýzy pro nejvyšší testované řezné a posuvové rychlosti jsou uvedeny na *Obr. 4.30*. Přesnost vibrační analýzy na takto nízkých frekvencích můžeme proto považovat pouze za hraničně dostatečnou. Jediným účinným způsobem, jak zlepšit rozlišení měření na nízkých frekvencích by bylo brousit výrazně delší vzorek, čímž by se přímo úměrně prodloužil čas broušení a tedy i počet zaznamenaných bodů, které by mohly být pro analýzu použity.



Obr. 4.30 Optimální parametry Fourierovy transformace pro vzorky s posuvovou rychlostí v_{f3}

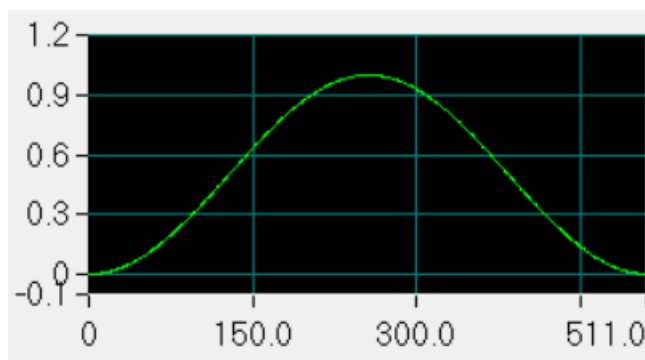
Při všech analýzách byla, vzhledem na náhodnou povahu vstupního signálu aplikována

oknová (nebo také okénková, dle zdroje) funkce typu Hanning. Ta je definovaná vztahem [93].

$$w_H(k) = \begin{cases} 1 - \cos(2\pi k/N), & 0 \leq k < N \\ 0, & k < 0, k \geq N \end{cases} \quad (4.2)$$

kde N je doba záznamu, v našem případě vyjádřená počtem bodů a k je pořadové číslo bodu.

Grafický průběh oknové funkce Hanning pro 512 bodů analýzy je na *Obr. 4.31*. Jedná se o váhovou funkci.



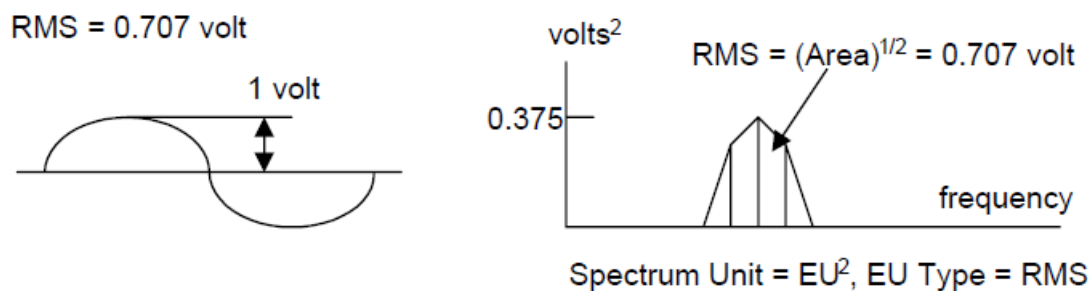
Obr. 4.31 Grafický průběh oknové funkce Hanning pro 512 bodů [123]

Aplikací oknové funkce na časový průběh signálu se výrazně sníží efekt "úniku" (ang. Leakage), který je důsledkem konečné délky záznamu při nenulové hodnotě signálu. "Únik" se může následně projevit ve frekvenční oblasti vznikem vysokého počtu zdánlivých poklesů [93]. Negativním dopadem aplikace oknové funkce je ovlivnění amplitudové charakteristiky signálu. Na její kompenzaci využívá software RT Pro Photon pro výkonové spektrum signálu takzvaný *Window Area Correction Factor*, tedy kompenzaci plochy pod křivkou. Ta je definována vztahem [123].

$$WACF = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} w_H(k)^2 \quad (4.3)$$

kde N je počet bodů analýzy a $w_H(k)$ je použitá oknová funkce typu Hanning.

Vyjádření efektivní hodnoty signálu (RMS) a plochy pod křivkou zachycuje *Obr. 4.32*.



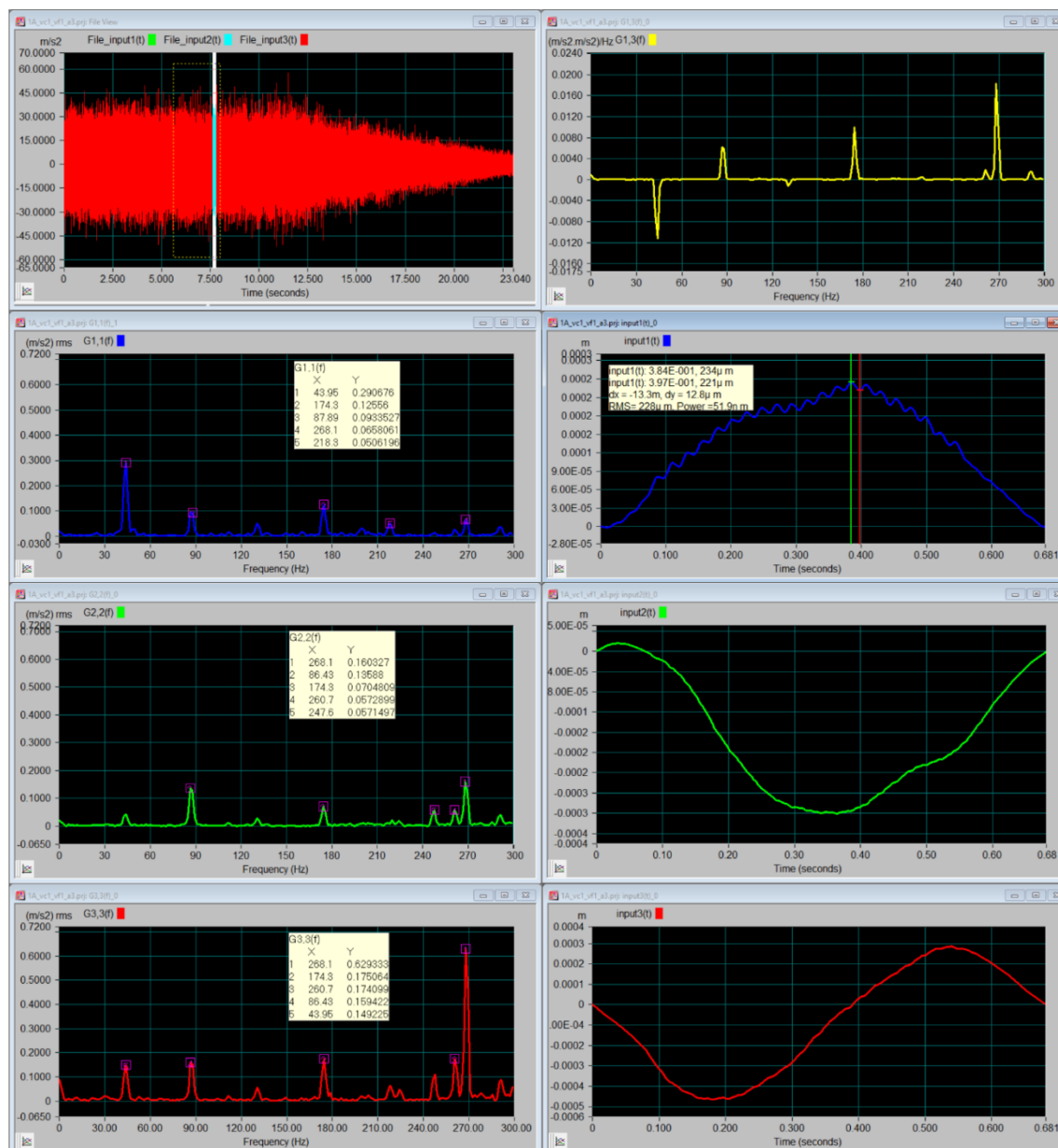
Obr. 4.32 Efektivní hodnota signálu a plocha pod křivkou

Grafické průběhy a jejich interpretace

V grafech na Obr. 4.33 až Obr. 4.37 jsou zachyceny průběhy pro vybrané testované vzorky. Popis grafů a jejich interpretace je demonstrována na vzorku **1A_vc1_vf1_a3** (Obr. 4.33).

Ze vstupního signálu zobrazeného v časové oblasti byla vypočítána výkonová spektra ve frekvenční oblasti výhradně pro moment záběru. Záběr je lokalizován svislou bílou plochou na grafu vstupního signálu (vlevo nahoře, červený průběh, označený jako *File View*). Na grafu G1,3(f) je žlutou barvou zobrazeno křížové spektrum výkonu mezi kanály 1 a 3, tedy mezi osou X a Z. Jde o jeden z hlavních indikátorů momentu záběru. Jelikož z fyzikální podstaty dojde v momentě záběru k mechanickému "propojení" vřetena stroje a lineárního pojezdu stolu, tak musí i síly a vibrace mezi těmito osami interagovat a navzájem na sebe působit. Z grafu je vidět velikost působení, jeho směr a frekvenci.

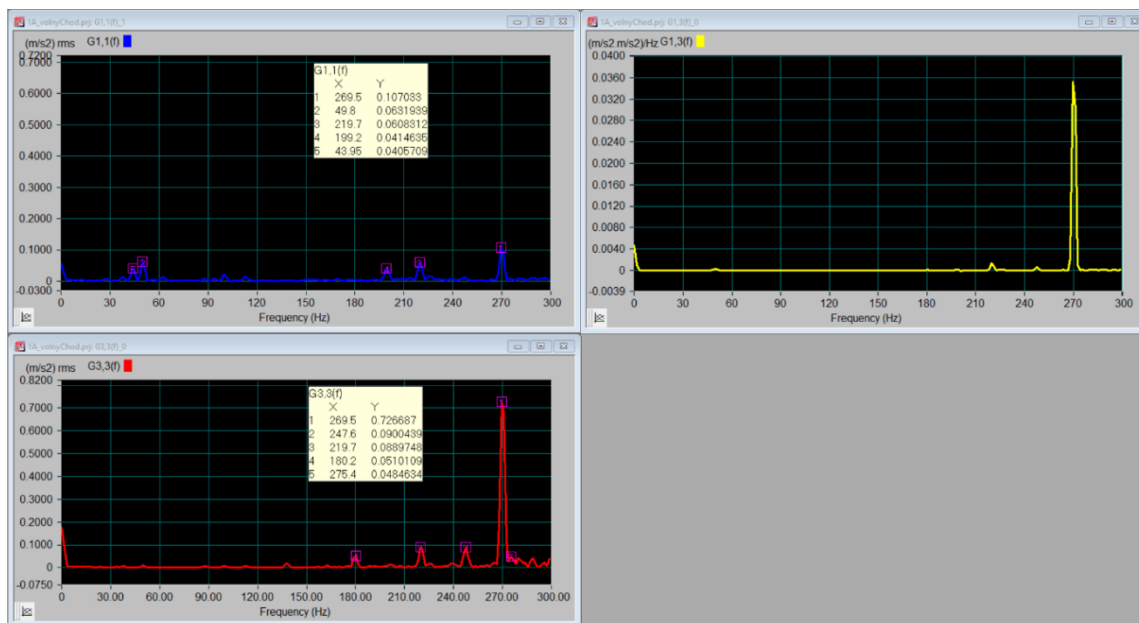
Průběh G1,1(f) je výkonovým spektrem prvního kanálu, tedy osy X, která představuje směr lineárního pojezdu stolu (graf vlevo). Dvojitou integrací zrychlení v čase byl získán graf dráhy input1(t) (vpravo). Ten reprezentuje mechanickou výchylku lineárního pojezdu v čase. **Průběhy související s osou X jsou zobrazeny modrou barvou.** Stejným způsobem byly získány **průběhy pro osu Y (zelená)**, která představuje směr kolmý na rovinu otáčení nástroje a **osa Z (červená)**, která je orientována ve směru gravitace.



Obr. 4.33 Frekvenční spektra a průběhy dráhy v osách X, Y a Z pro vzorek 1A_vc1_vf1_a3

Pomocí automatických kurzorů, bylo ve výkonovém spektru signálu lokalizováno 5 frekvencí s největší energií. Z průběhů je zřejmé, že **největší energii v okolí otáčkové frekvence vykazuje osa X**. Pro analyzovaný vzorek 1A_vc1_vf1_a3 byla nominální otáčková frekvence $f_{s1} = 42,03$ Hz. Naměřená frekvence byla 43,95 Hz. Tuto nosnou frekvenci vykazovaly všechny vzorky příslušející řezné rychlosti v_{c1} . Rozdíl na úrovni 4,5% lze připisovat nedostatečnému rozlišení FFT analýzy a/nebo reálně rychlejším otáčkám vřetena. Nominální otáčky nástroje byly určeny z tabulky parametrů stroje (Tab. 4.5 Parametry brusky BPH 320A.), nebyly však přímo měřeny nebo jinak ověřeny. Z výsledků předchozí podkapitoly o působení řezných sil byla vypočtena frekvence 42,97 Hz. Výslednou nejistotu na úrovni $\pm 2\%$ hodnoty můžeme považovat za akceptovatelnou.

Zajímavý je výskyt **frekvence okolo hodnoty 266 až 270 Hz** pocházející od **osy Z**. Nejedná se o vyšší harmonickou základní otáčkové frekvence a dokonce tato frekvence není na otáčkové frekvenci vůbec závislá (jak dokazují grafy na *Obr. 4.34*) a je přítomna i mimo záběr stroje. Její další analýze se věnuje text v samostatném odstavci uvedeném později.



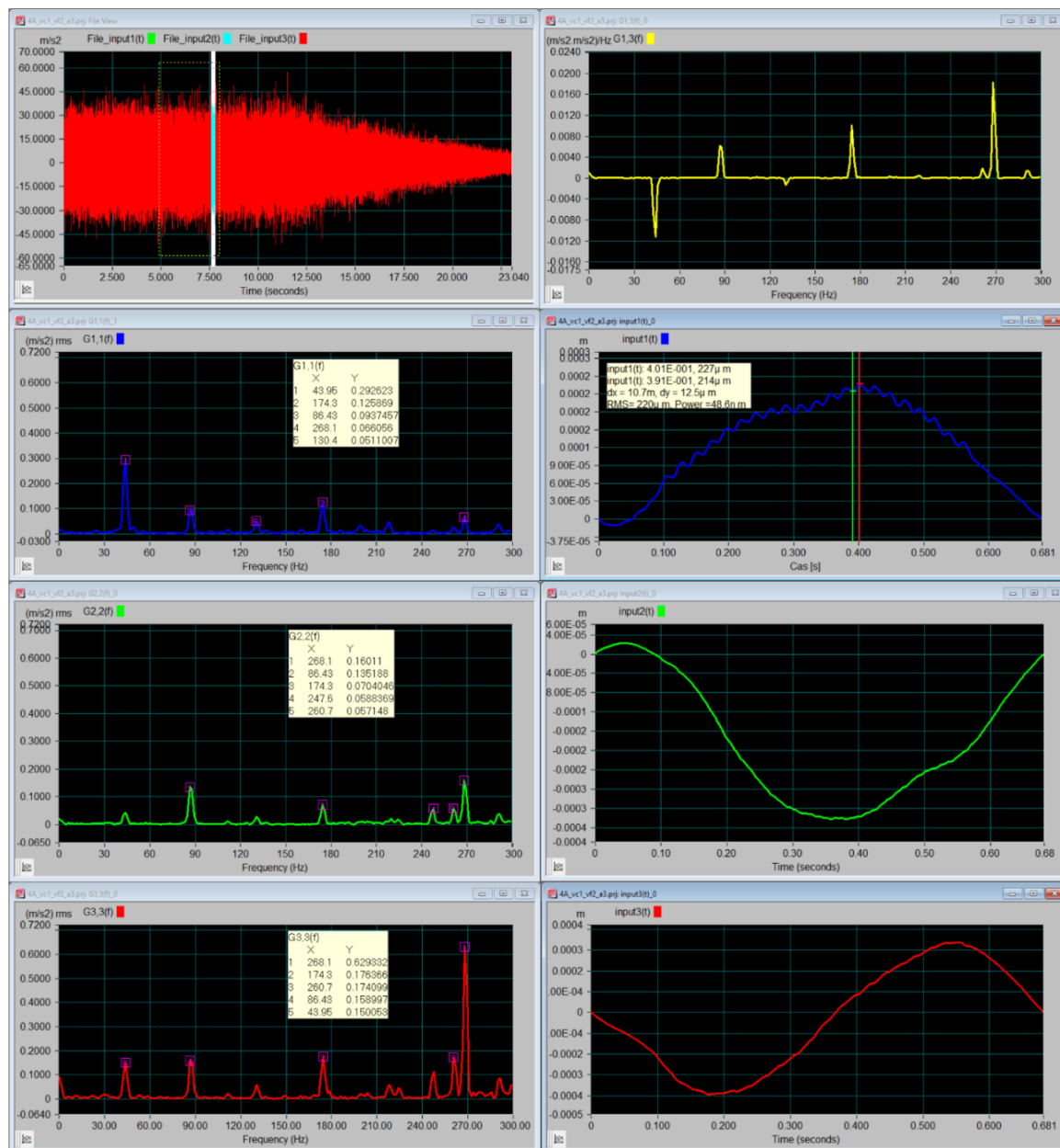
Obr. 4.34 Zobrazení přítomnosti frekvence na úrovni 270 Hz

Průběhy zobrazující **spektrum osy Y** nevykazují žádné anomálie. Od této osy nepronikají do systému žádné podstatné vibrace, naopak přenášejí se do ní vibrace z ostatních směrů. Její dalšímu analyzování proto není věnován prostor.

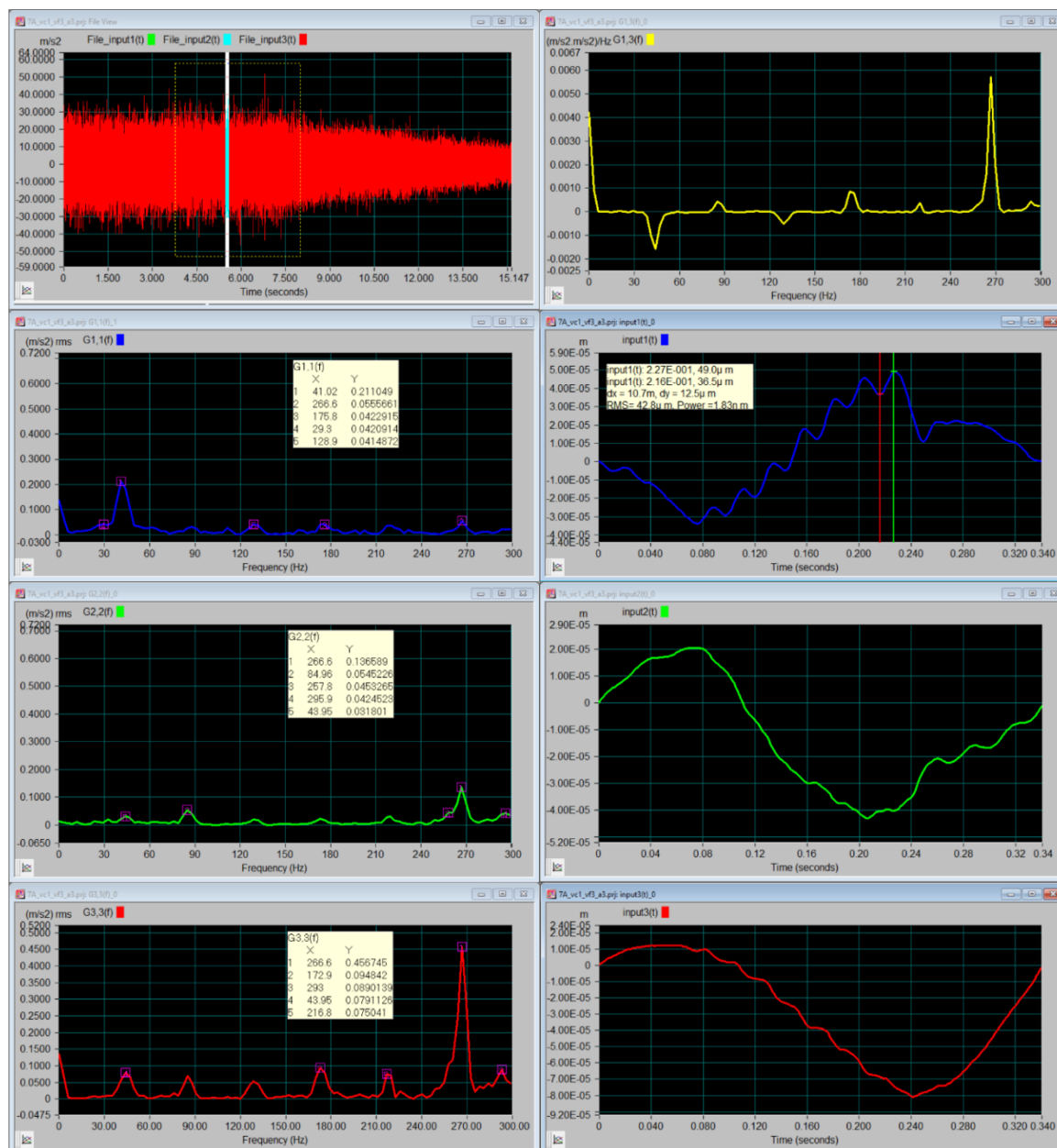
Akcelerometr, jako snímací prvek, je primárně vhodný k zachycování rychlých dějů, vibrací. Jeho použití jako snímače dráhy, tedy děje relativně pomalého, není optimální. K tomuto účelu je dostupné množství vhodnějších snímačů, které měří přímo údaj dráhy. V případě akcelerometru mají, kvůli integrálnímu charakteru výpočtu dráhy, výsledky takto získané tendenci divergence od skutečné hodnoty vzdálenosti. Pokud je ale analyzován časový úsek dostatečně krátký a je postačující relativní vyhodnocení dráhy, je možné získat údaj dostatečně přesný. Díky tomu **byl z grafu na Obr. 4.33 lokalizován hlavní zdroj vibrací a problému, který způsoboval vznik periodických čar na povrchu vzorků**. Z průběhu dráhy osy X je vidět kmitání na úrovni blízké otáčkové frekvenci. Toto kmitání představuje podélný pohyb vzorku. Pravděpodobným důvodem byl pružný charakter gumových podložek, které byly použity při upnutí křehkého vzorku do svěráku. To způsobovalo nerovnoměrný pohyb obráběného vzorku pod brusným kotoučem. Některá místa proto byla přebroušena více (když vzorek "couval") a některá méně (když byl vzorek akcelerován "dopředu"). To muselo nutně způsobovat nárůst a pokles řezných sil, které byly pozorovány pomocí dynamometru. Amplituda kmitání vzorku byla odečtena pomocí kurzorů a dosáhla hodnotu 12,8 μm . Obdobné amplitudy jsou vidět i při ostatních vzorcích odpovídajících řezné rychlosti v_{c1} . Pro rychlost v_{c2} jsou zaznamenány kmity násobně

menší a dosahují úroveň 2 - 4 μm . To opět koresponduje s výsledky z analýzy silového působení, kdy bylo prokázáno, že při vyšších řezných rychlostech jsou řezné síly v systému menší.

Vzorek **4A_vc1_vf2_a3** vykazuje stejné tendence i základní hodnoty jako vzorek 1A_vc1_vf1_a3. U vzorku **7A_vc1_vf3_a3** bylo rozlišení analýzy dvojnásobně horší (viz komentář výše), čemuž můžeme připisovat mírně odlišné hodnoty. Průběhy analýz pro vzorky 4A_vc1_vf2_a3 a 7A_vc1_vf3_a3 jsou zobrazeny na obrázcích *Obr. 4.35* a *Obr. 4.36*.

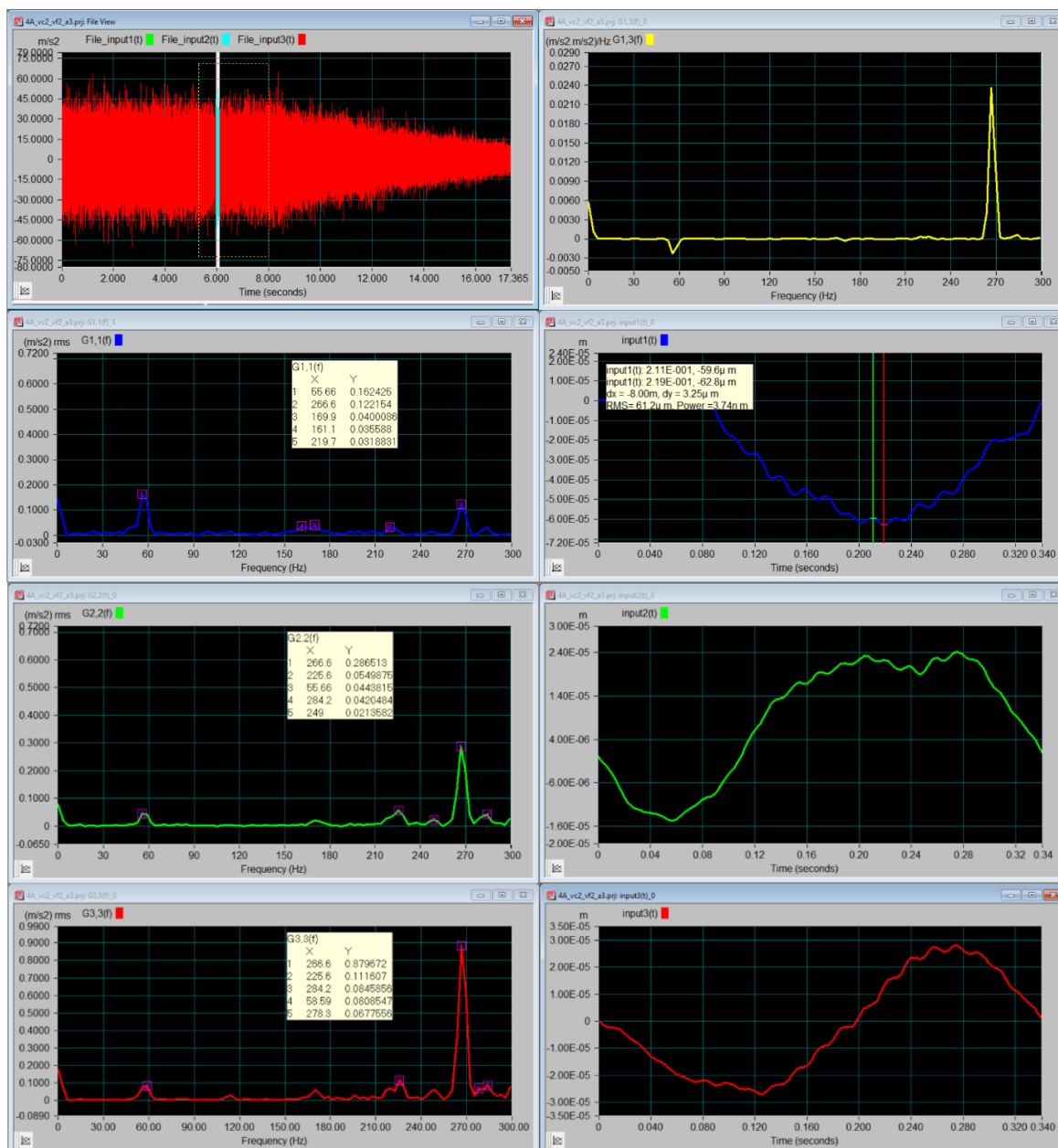


Obr. 4.35 Frekvenční spektra a průběhy dráhy v osách X, Y a Z pro vzorek 4A_vc1_vf1_a3



Obr. 4.36 Frekvenční spektra a průběhy dráhy v osách X, Y a Z pro vzorek 7A_vc1_vf1_a3

Po zvýšení otáčkové rychlosti na hodnotu v_{c2} byly působící síly i vibrace menší a zároveň časy broušení kratší, což se negativně projevilo na kvalitě vibrační analýzy. Tendence chování systému ale zůstaly zachovány a viditelné. Nosná frekvence kmitů byla ve všech případech **55,66 Hz**. Průběhy reprezentativního vzorku 4A_vc2_vf2_a3 jsou vyobrazeny na Obr. 4.37.

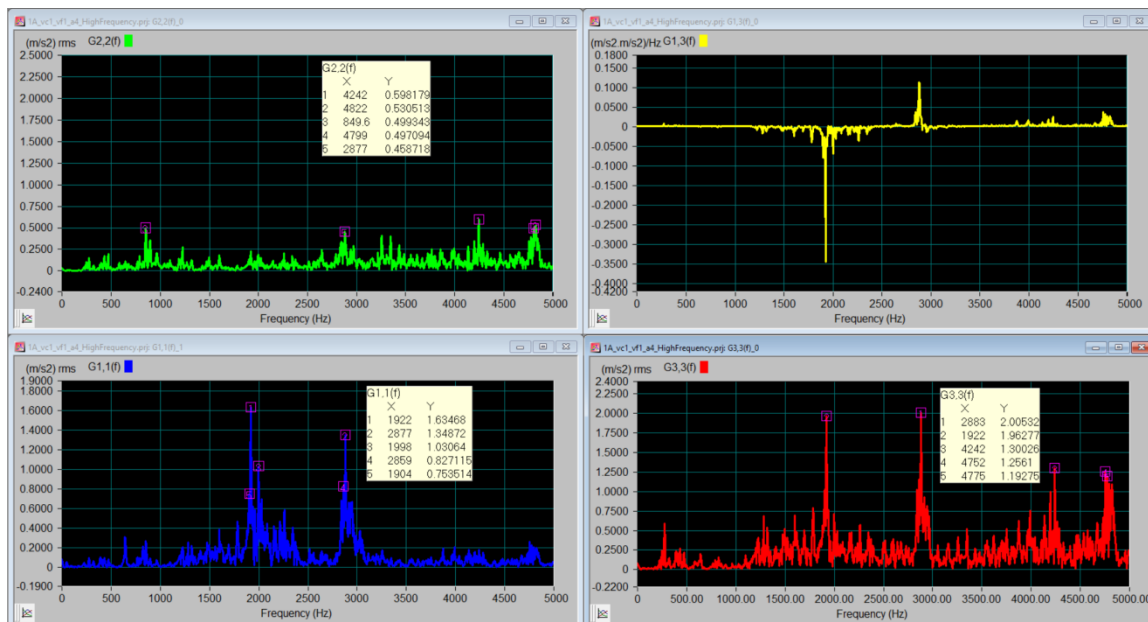


Obr. 4.37 Frekvenční spektra a průběhy dráhy v osách X, Y a Z pro vzorek 4A_vc2_vf1_a3

Z výše uvedených obrázků Obr. 4.33 až Obr. 4.37 je viditelný **dominantní vliv frekvence v rozsahu 266 až 270 Hz**. Její energie je násobně vyšší než energie 1. harmonické složky otáčkové frekvence i všech vyšších harmonických. Její frekvence je navíc nezávislá na otáčkové frekvenci vřetena brusky. Z toho můžeme usuzovat, že jejím zdrojem je místo před převodovkou vřetena. Může indikovat opotřebenou část stroje (ložisko nebo ozubení) nebo nevývahu rotující části stroje. Přesná lokalizace zdroje je nad rámec této práce. Její přítomnost ale třeba brát při posuzování dopadu v úvahu.

Jako poslední byla realizována širokofrekvenční analýza vibrací stroje. Ta zachycuje typický hluk obráběcího stroje v provozu a její výkonové a křížové frekvenční spektrum je

zobrazeno na *Obr. 4.38*. Mezi chodem naprázdno a momentem záběru není zásadní rozdíl. Převládající jsou pokaždé vysoké frekvence na úrovni přibližně 1920 Hz, 2880 Hz a 4750 Hz. Takto vysoké frekvence nemají s výskytem čar na povrchu vzorků přímý vztah, proto se jejich analýzou není nutné dále zabývat. Kvalitativní posouzení stavu brusky pomocí vibrodiagnostiky představuje samostatnou výzvu, jíž by měla být věnována zvláštní pozornost.



Obr. 4.38 Širokokřekvenční analýza vibrací stroje

4.3.3 Analýza struktury povrchu

Jedním z primárních cílů řešení disertační práce bylo odhalit vztah a porozumět vazbám mezi řeznými podmínkami a kvalitou povrchu keramických součástí, v tomto případě vzorků z karbidu křemíku. Byl tedy zrealizován experiment (dle popisu v kapitole 4.2), jehož cílem bylo:

- zjistit, jestli řezné podmínky dle *Tab. 4.9* a jejich vzájemné působení mají vliv na parametry drsnosti povrchu R_a a R_z ,
- najít takovou kombinaci řezných podmínek, při jejímž použití bude dosaženo nejlepších hodnot parametrů drsnosti povrchu a to vzhledem k podmínkám, které je možné použít na pracovišti Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně.

Vybrané parametry drsnosti povrchu byly v první fázi změřeny dotykovou metodou pomocí profiloměru Form Talysurf Intra. Kontaktní metoda měření byla první volbou, protože se jedná o nerozšířenější způsob měření používaný v průmyslové praxi. Z důvodu výskytu periodických čar bylo hodnocení povrchu rozšířeno o optické vyhodnocení pomocí strojového vidění, které nejlépe reprezentuje subjektivní, lidské, vnímání kvality povrchu. Měření bylo jen informativní a mělo za cíl potvrdit výsledky získané analýzou silového působení a vibrací. Na reprezentativní skupině vzorků bylo realizováno plošné snímání a hodnocení kvality povrchu, a to pomocí bezkontaktního optického profiloměru

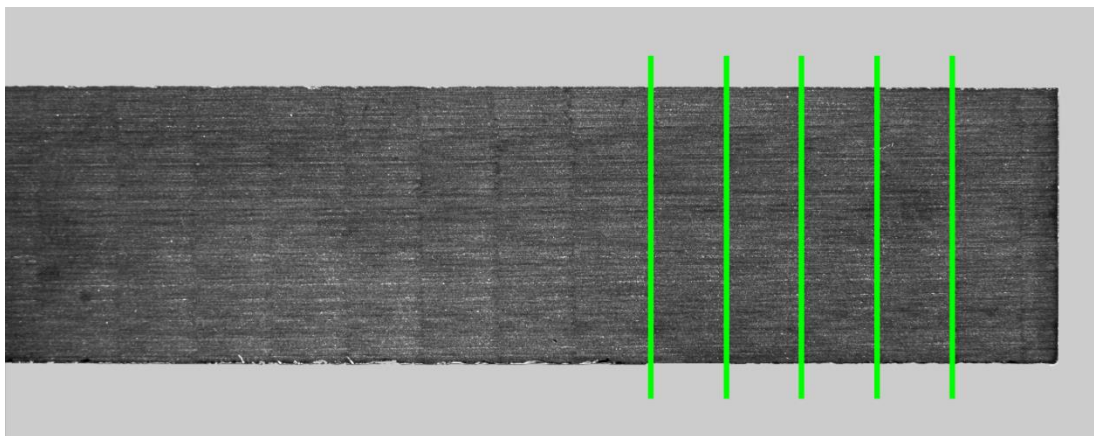
Alicona IFM G4.

K vyšetření závislosti mezi řeznými podmínkami a parametry drsnosti povrchu získané kontaktní metodou byla využita regresní analýza. Pro její výpočet byl použit statistický software Minitab 15.

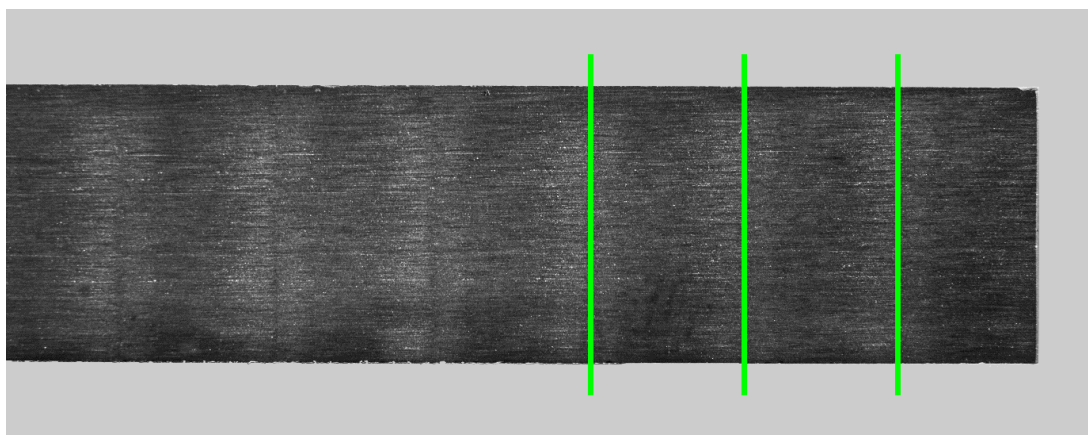
Optické hodnocení kvality povrchu

Pomocí sestavy strojového vidění (fotoaparát - objektiv - osvětlení - snímaný objekt) a softwaru Halcon byly vyhodnoceny rozestupy periodických čar na jednotlivých vzorcích.

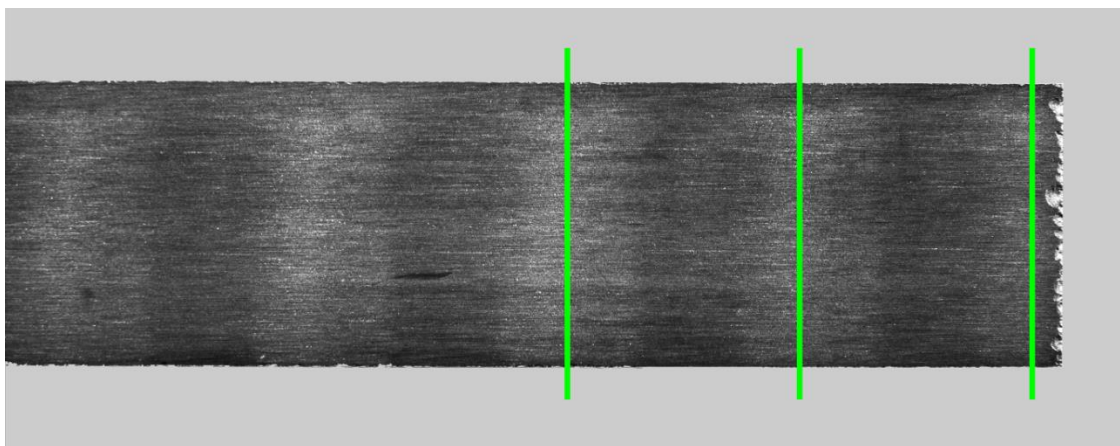
Z obrázků *Obr. 4.39* až *Obr. 4.44* je vidět přímá úměra mezi řeznými podmínkami a hustotou čar. Do výběru byly zařazeny vzorky broušené bez změny hloubky záběru a_e , která nemá na frekvenci čar vliv. Hodnota hloubky záběru byla $a_e = 0,05 \text{ mm}$.



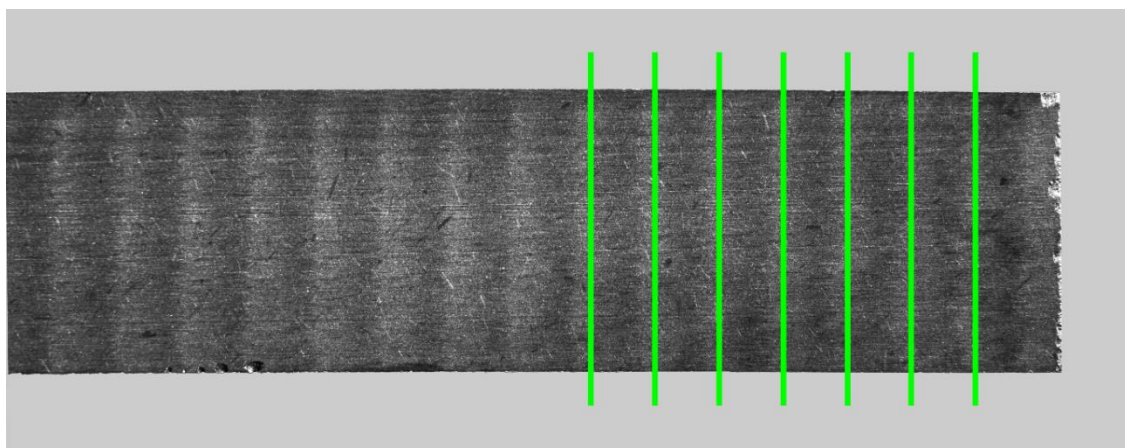
Obr. 4.39 Vzorek 1A_vc1_vf1_a3



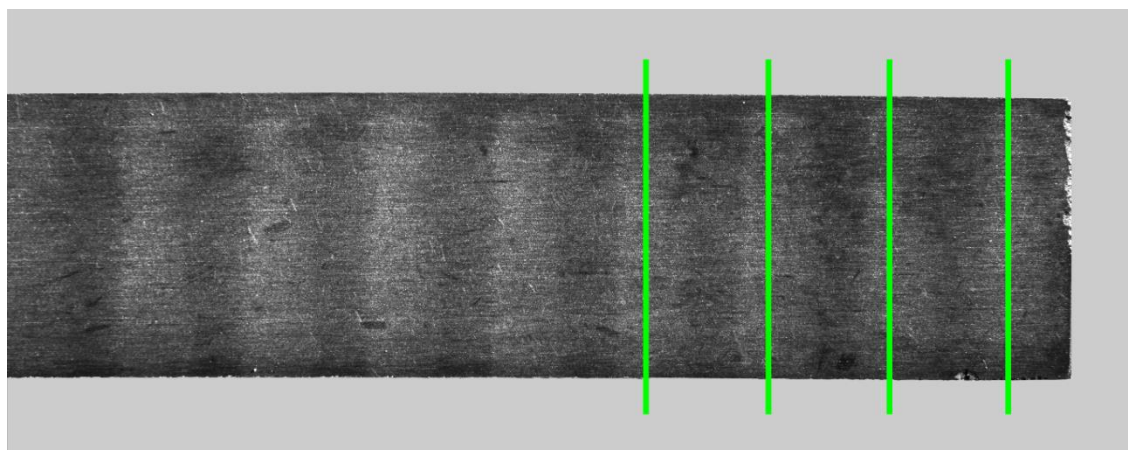
Obr. 4.40 Vzorek 4A_vc1_vf1_a3



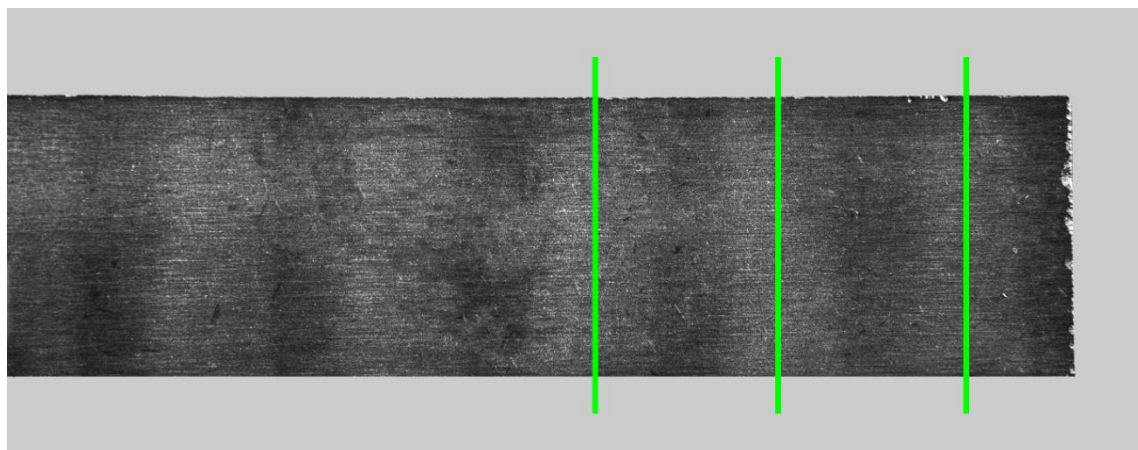
Obr. 4.41 Vzorek 7A_vc1_vf1_a3



Obr. 4.42 Vzorek 1A_vc2_vf1_a3



Obr. 4.43 Vzorek 4A_vc2_vf1_a3



Obr. 4.44 Vzorek 7A_vc2_vf1_a3

Softwarem pro zpracování obrazu byly získány průměrné vzdálenosti periodických čar. Ze známých řezných podmínek a frekvence kmitání zjištěných při vibrační analýze byly vypočítány očekávané průměrné vzdálenosti čar. Jejich číselná reprezentace a vzájemné srovnání jsou v Tab. 4.13.

Tab. 4.13 Číselná reprezentace vzdálenosti čar a jejich vzájemné srovnání

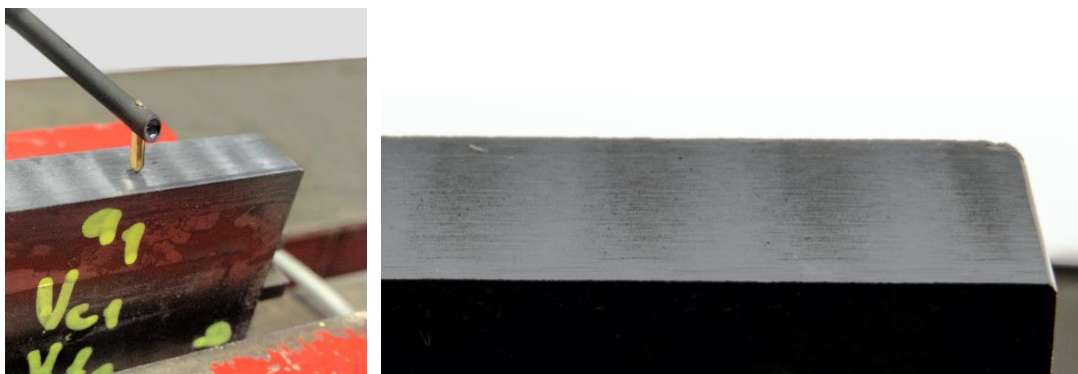
vzorek	vzdálenost čar [mm] (strojové vidění)	vzdálenost čar [mm] (numerický výpočet)	odchylka [%]
1_vc1_vf1	2,45	2,37	-3,4%
4_vc1_vf2	4,53	4,32	-4,9%
7_vc1_vf3	6,55	6,39	-2,5%
1_vc2_vf1	1,93	1,87	-3,2%
4_vc2_vf2	3,5	3,41	-2,6%
7_vc2_vf3	5,28	5,04	-4,8%

Platí, že vzdálenost čar přímo úměrně roste s posuvovou rychlostí a přímo úměrně klesá s řeznou rychlostí.

Navzdory systematickému posunu údaje ze strojového vidění na úrovni 3 - 5%, které bylo zapříčiněno buď kalibrací aparatury strojového vidění a/nebo algoritmem k určení středu čáry z obrazu, byla touto doplňkovou metodou prokázána relevantnost zjištění z analýzy silového působení a vibrací během broušení.

Hodnocení vlivu řezných podmínek na parametry drsnosti povrchu

Měření parametrů drsnosti v axiálním směru bylo realizováno kontaktním profiloměrem Talysurf Intra s osazeným ramínkem délky 57,5 mm, diamantovým měřícím hrotem s úhlem 90 ° a poloměrem špičky 2 μm. Ukázka z měření a detail vyhodnocované plochy je na Obr. 4.45. Měřený byl profil na základní délce 0,8 mm a celkové délce měření 4,0 mm. Výsledky měření jsou zaznamenány v Tab. 4.14.



Obr. 4.45 Ukázka z kontaktního měření a detail vyhodnocované plochy

Tab. 4.14 Výsledky měření drsnosti povrchu kontaktní metodou

FAKTORY			SLEDOVANÉ VELIČINY	
Řezná rychlost v_c [m/s]	Posuvová rychlost v_f [m/min]	Hloubka záběru [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]
23,1	6,25	0,01	0,6347	4,8412
23,1	6,25	0,03	0,4695	4,2018
23,1	6,25	0,05	0,3117	2,901
23,1	6,25	0,07	0,2465	3,3224
23,1	11,39	0,01	0,3619	2,8469
23,1	11,39	0,03	0,2032	1,9309
23,1	11,39	0,05	0,2472	3,1086
23,1	11,39	0,07	0,3711	3,2471
23,1	16,84	0,01	0,2362	2,0099
23,1	16,84	0,03	0,3829	2,9294
23,1	16,84	0,05	0,6470	5,2096
23,1	16,84	0,07	0,3368	2,5985
30,4	6,25	0,01	0,2989	2,1951
30,4	6,25	0,03	0,3054	3,1234
30,4	6,25	0,05	0,3588	2,7764
30,4	6,25	0,07	0,2812	2,4276
30,4	11,39	0,01	0,4288	3,6743
30,4	11,39	0,03	0,2668	2,9226
30,4	11,39	0,05	0,2720	2,4971
30,4	11,39	0,07	0,4929	3,6036
30,4	16,84	0,01	0,4238	3,3523
30,4	16,84	0,03	0,3545	2,7391
30,4	16,84	0,05	0,3767	2,9571
30,4	16,84	0,07	0,5139	3,5041

Pomocí softwaru Minitab 15 byly určeny závislosti mezi vstupními řeznými podmínkami a naměřenými hodnotami vybraných parametrů drsnosti povrchu vzorků. V prvním kroku vstupují do modelu všechny nezávisle proměnné. Výstup lineární regresní analýzy je uveden v následujícím přehledu:

Regression Analysis: Ra versus vc; vf; ae

The regression equation is

$$Ra = 0,480 - 0,00645 \text{ vc} + 0,00763 \text{ vf} - 0,167 \text{ ae}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,4796	0,1494	3,21	0,002
vc	-0,006454	0,005514	-1,17	0,248
vf	0,007634	0,004031	1,89	0,065
ae	-0,1671	0,7795	-0,21	0,831

S = 0,120762 **R-Sq = 10,2%** R-Sq(adj) = 4,1%

Ve výše uvedeném přehledu výsledků je zásadní hodnota R^2 (R-Sq/R Square), tedy *koeficient determinace*. Hodnota v červeném rámečku vyjadřuje procentuální podíl z rozptylu hodnot Ra, Rz, jež je možné vysvětlit pomocí vypočtené regresní funkce. Funkce je tím vhodnější, čím je hodnota R^2 bližší 100 %. Z výsledků lineární regresní analýzy plyne, že pouze 10,2 % hodnot lze uvedenou regresní funkcí popsat. Výsledky naznačují vzájemnou nezávislost proměnných.

Z vypočteného modelu byly v dalších krocích odebírány nezávisle proměnné s nejvyšší P-hodnotou. Žádný další model nepřinesl změnu výsledku směrem k vyšším hodnotám R^2 .

Výsledky byly zpracovány také kvadratickou regresí. Výstupy kvadratické regrese jsou uvedeny v následujícím přehledu:

Regression Analysis: Ra versus vc; vf; ae; vc^2; vf^2; ae^2

The regression equation is

$$Ra = 0,658 - 0,00645 \text{ vc} - 0,0127 \text{ vf} - 5,81 \text{ ae} + 0,00088 \text{ vf}^2 + 70,6 \text{ ae}^2$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,6583	0,2157	3,05	0,004
vc	-0,006454	0,005444	-1,19	0,242
vf	-0,01266	0,03042	-0,42	0,679
ae	-5,813	3,527	-1,65	0,107
vf^2	0,000877	0,001303	0,67	0,505
ae^2	70,57	43,02	1,64	0,108

S = 0,119222 **R-Sq = 16,5%** R-Sq(adj) = 6,5%

Regression Analysis: Ra versus vc; ae; vc^2; vf^2; ae^2

The regression equation is

$$Ra = 0,594 - 0,00645 \text{ vc} - 5,81 \text{ ae} + 0,000339 \text{ vf}^2 + 70,6 \text{ ae}^2$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,5938	0,1487	3,99	0,000
vc	-0,006454	0,005391	-1,20	0,238
ae	-5,813	3,493	-1,66	0,103
vf^2	0,0003392	0,0001688	2,01	0,051
ae^2	70,57	42,60	1,66	0,105

S = 0,118070 R-Sq = 16,1% R-Sq(adj) = 8,3%

Regression Analysis: Ra versus ae; vc^2; vf^2; ae^2

The regression equation is

$$Ra = 0,509 - 5,81 \text{ ae} - 0,000121 \text{ vc}^2 + 0,000339 \text{ vf}^2 + 70,6 \text{ ae}^2$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,50913	0,09006	5,65	0,000
ae	-5,813	3,493	-1,66	0,103
vc^2	-0,0001206	0,0001008	-1,20	0,238
vf^2	0,0003392	0,0001688	2,01	0,051
ae^2	70,57	42,60	1,66	0,105

S = 0,118070 R-Sq = 16,1% R-Sq(adj) = 8,3%

Regression Analysis: Ra versus ae; vf^2; ae^2

The regression equation is

$$Ra = 0,433 - 5,81 \text{ ae} + 0,000339 \text{ vf}^2 + 70,6 \text{ ae}^2$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,43297	0,06407	6,76	0,000
ae	-5,813	3,510	-1,66	0,105
vf^2	0,0003392	0,0001697	2,00	0,052
ae^2	70,57	42,81	1,65	0,106

S = 0,118650 R-Sq = 13,3% R-Sq(adj) = 7,4%

Regression Analysis: Ra versus ae; vf^2

The regression equation is

$$Ra = 0,355 - 0,167 ae + 0,000339 vf^2$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,35534	0,04425	8,03	0,000
ae	-0,1671	0,7804	-0,21	0,831
vf^2	0,0003392	0,0001729	1,96	0,056

S = 0,120893 R-Sq = 8,0% R-Sq(adj) = 3,9%

Regression Analysis: Ra versus vf^2

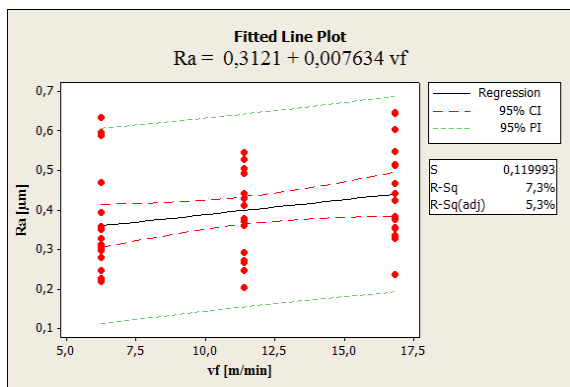
The regression equation is

$$Ra = 0,349 + 0,000339 vf^2$$

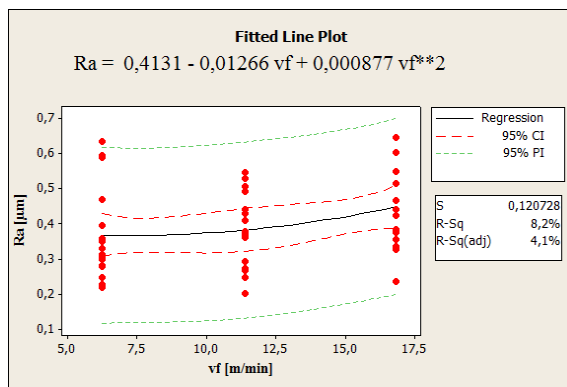
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,34866	0,03104	11,23	0,000
vf^2	0,0003392	0,0001711	1,98	0,053

S = 0,119632 R-Sq = 7,9% R-Sq(adj) = 5,9%

Grafický náhled výsledků regresní analýzy pro přímku a parabolu na Obr. 4.46 je uveden pro závislost posuvové rychlosti na střední aritmetické úchylce povrchu Ra.



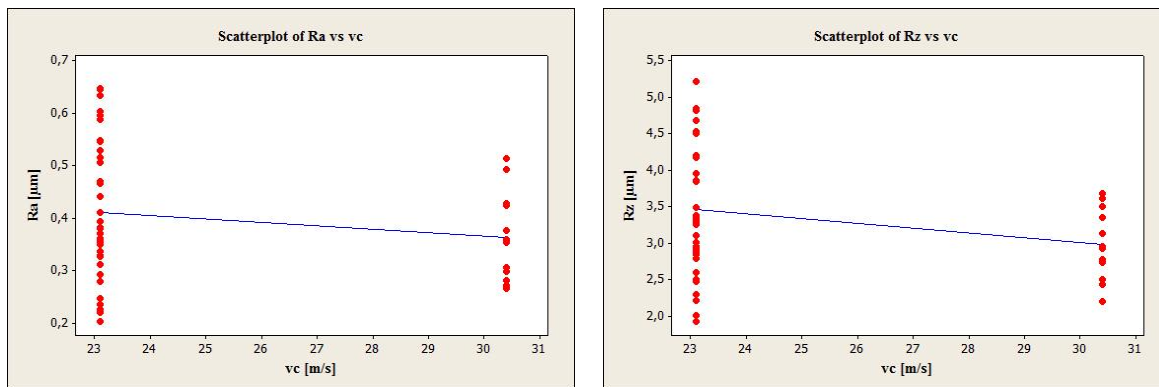
a) Výsledek lineární regresní analýzy.



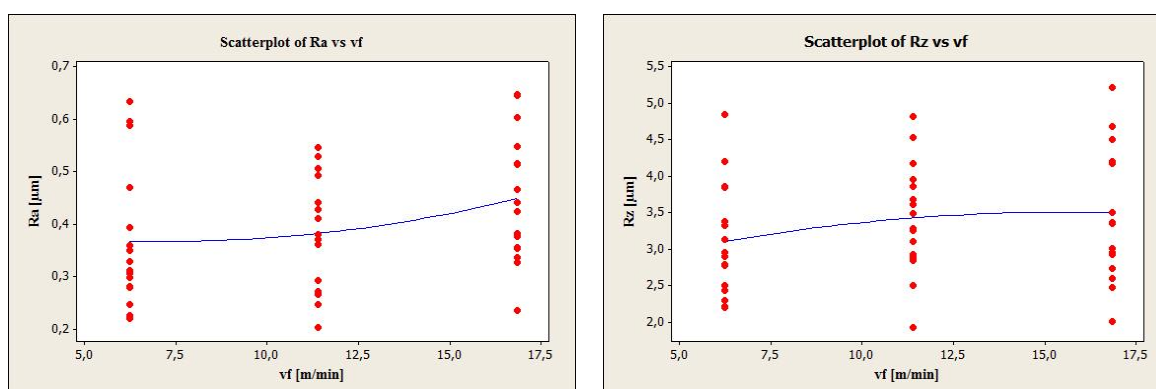
b) Výsledek kvadratické regresní analýzy.

Obr. 4.46 Závislost střední aritmetické úchylky povrchu na posuvové rychlosti.

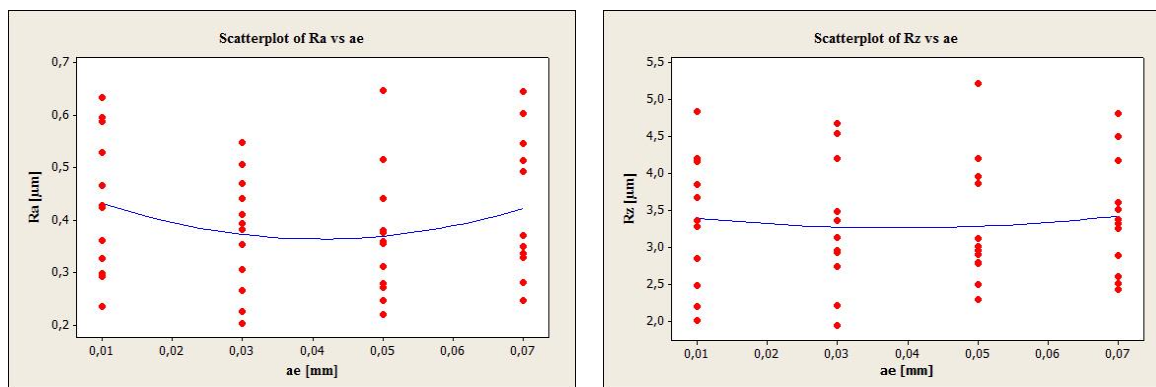
Korelační diagramy na Obr. 4.47 až Obr. 4.49 graficky ilustrují vzájemné vztahy mezi řeznými podmínkami a parametry drsnosti povrchu Ra a Rz.



Obr. 4.47 Korelační diagram vzájemného vztahu mezi parametry drsnosti povrchu R_a , R_z a řeznou rychlostí v_c .



Obr. 4.48 Korelační diagram vzájemného vztahu mezi parametry drsnosti povrchu R_a , R_z a řeznou rychlostí v_f .

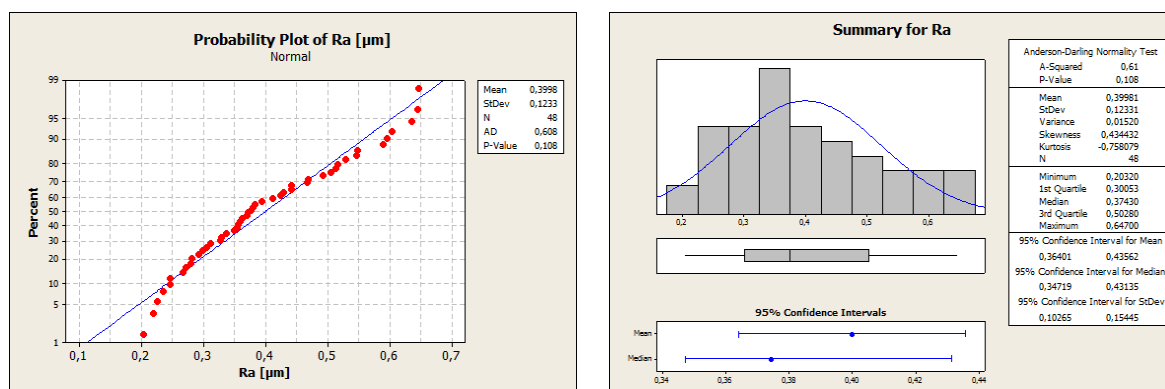


Obr. 4.49 Korelační diagram vzájemného vztahu mezi parametry drsnosti povrchu R_a , R_z a hloubkou záběru a_e .

Pro řadu statistických metod je nutné, aby příslušná náhodná veličina, jejíž naměřené hodnoty máme v datovém souboru, měla normální rozdělení. V tomto případě se jedná o datové soubory naměřených hodnot R_a a R_z .

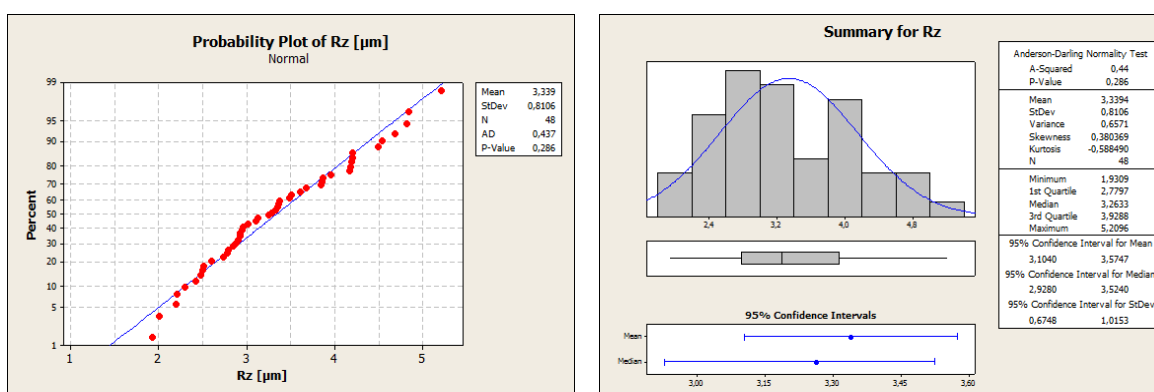
Normalita veličin R_a a R_z byla otestována tzv. „grafickou metodou“. Výstupy testů jsou znázorněny na Obr. 4.50 pro statistický soubor hodnot R_a a na obrázku Obr. 4.51 pro

statistický soubor hodnot Rz.



Obr. 4.50 Test normality pro statistický soubor naměřených hodnot Ra.

Protože $p=0,108 > 0,05$, hypotézu o výběru z normálního rozdělení nezamítáme na hladině významnosti 0,05.



Obr. 4.51 Test normality pro statistický soubor naměřených hodnot Rz.

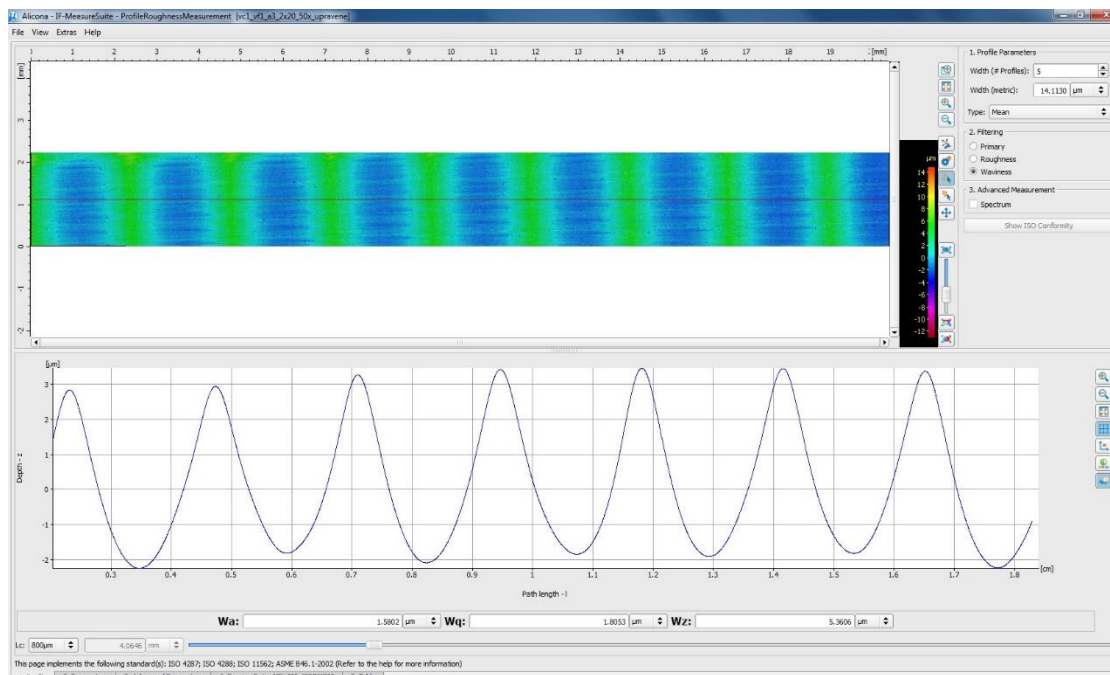
Protože $p = 0,286 > 0,05$, hypotézu o výběru z normálního rozdělení nezamítáme na hladině významnosti 0,05.

Statistické vyhodnocení potvrdilo očekávaný závěr, a tedy, že pozorované parametry drsnosti povrchu byly výrazně ovlivněny kmitáním systému v procesu broušení. Z grafických závislostí názorně plynu, že posuzované veličiny jsou statisticky nezávislé na vstupních proměnných. To nutně nevylučuje obecnou závislost parametrů drsnosti na řezných podmínkách, dokazuje to ale fakt, že hodnoty drsnosti se měnily nejen podle vstupního řezných podmínek, ale i podle místa měření na vzorku. Z toho vyplývá, že použití kontaktní metody měření není v tomto případě dostatečně objektivní.

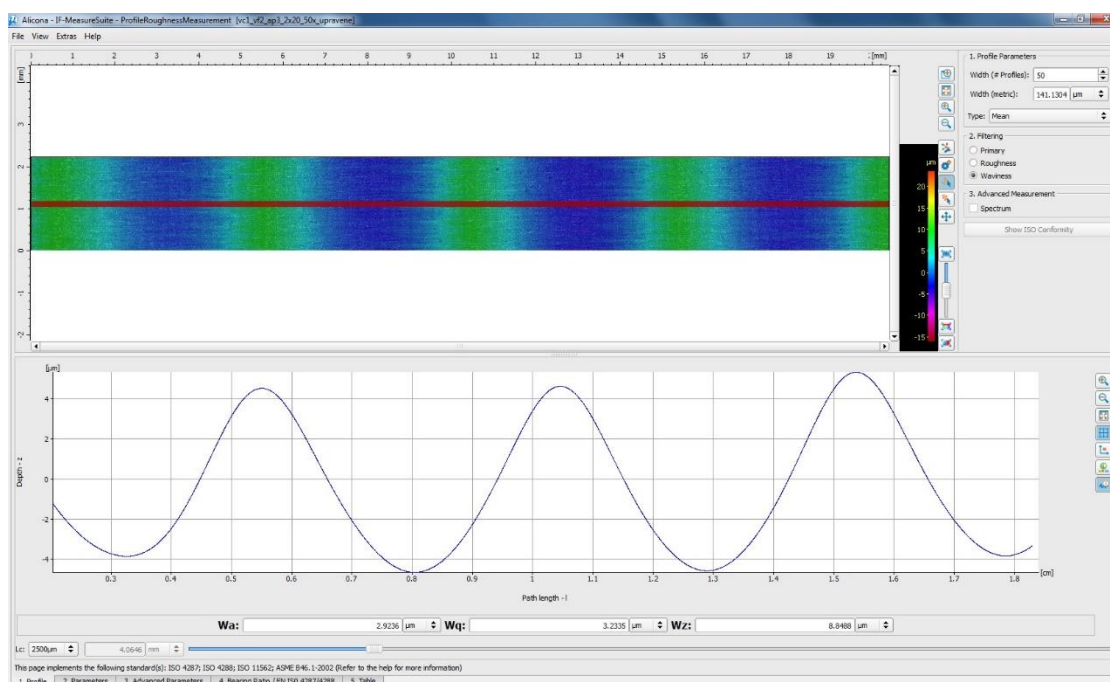
Přesto, že byly broušením dosaženy očekávané hodnoty parametrů Ra a Rz, obrobený povrch vykazuje značnou vlnitost. Tuto lze zdokumentovat pomocí bezkontaktní metody měření parametrů povrchu přístrojem Alicona IFM G4. Primárně bylo měření využito na vizuální zobrazení plochy povrchu v podobě barevné mapy výšky a z ní vypočítaná vlnitost. Výsledky parametrů drsnosti Ra a Rz naměřené v axiálním směru byly srovnatelné s kontaktní metodou, proto nepředstavují žádný zásadní přínos a nejsou publikovány. Výhodou plošného optického měření je lepší kontrola nad místem

vyhodnocení, celkový přehled o kvalitě povrchu a možnost vyhodnocení opakovat pro jiné vybrané místo. Nevýhodou je dlouhý čas snímání. Pro plochu velikosti 2 x 20 mm při výškovém rozlišení 0,14 μm a podélném rozlišení 2,13 μm byl čas měření jednoho vzorku přibližně 100 minut.

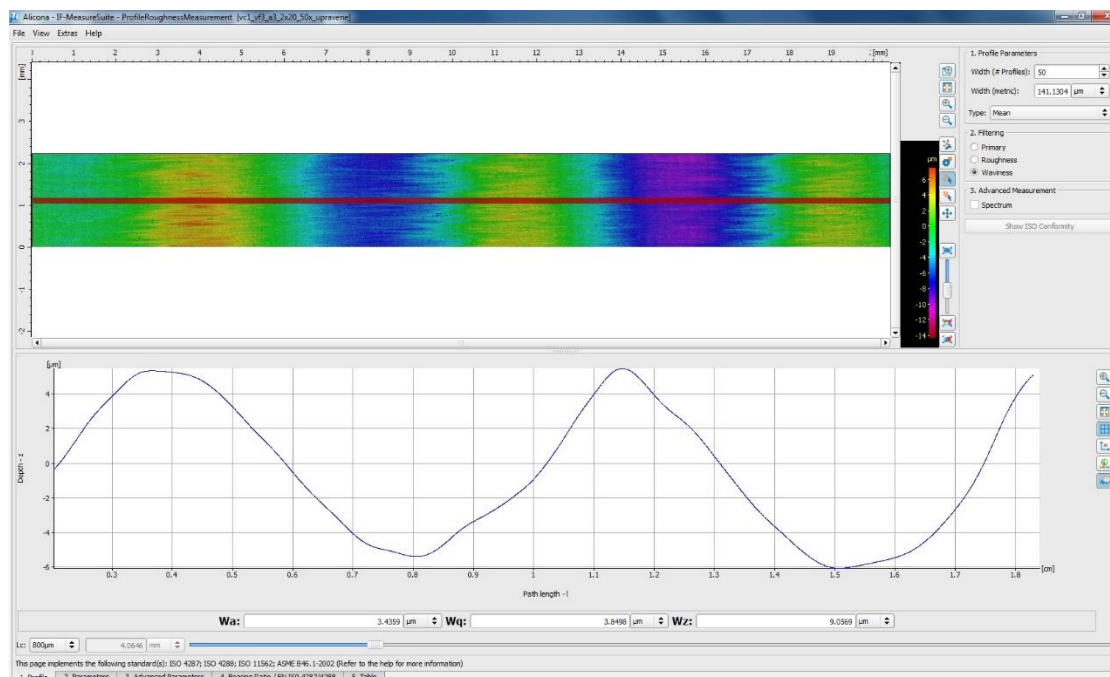
Pro vybrané vzorky je kvantitativní vyhodnocení vlnitosti vyobrazené na *Obr. 4.52* až *Obr. 4.55*. Rozsah hodnot se pohyboval v rozmezí 2 až 10 μm . Drsnost byla nerovnoměrně superponována na profil vlnitosti, což byl jeden z hlavních důvodů nízké míry závislosti kvality povrchu na řezných podmínkách.



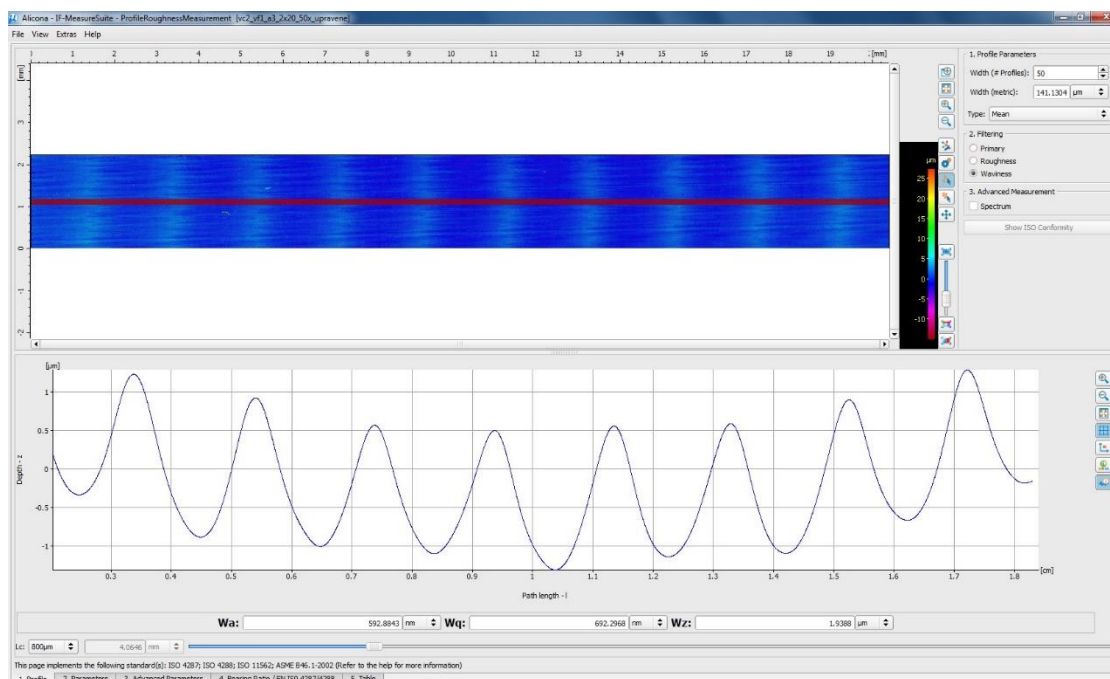
Obr. 4.52 Vyhodnocení vlnitosti povrchu vzorku 1A_vc1_vf1_a3



Obr. 4.53 Vyhodnocení vlnitosti povrchu vzorku 4A_vc1_vf2_a3



Obr. 4.54 Vyhodnocení vlnitosti povrchu vzorku 7A_vc1_vf3_a3



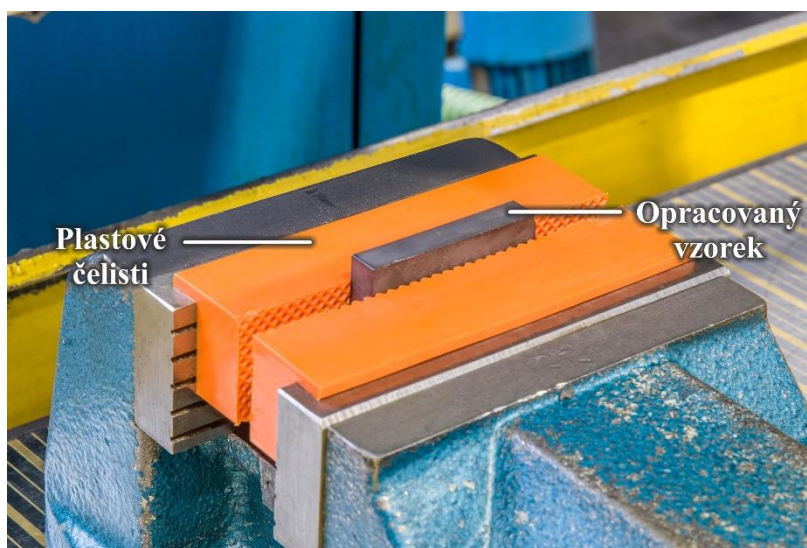
Obr. 4.55 Vyhodnocení vlnitosti povrchu vzorku 1A_vc2_vf1_a3

4.4 Opakovaný experiment

Hlavním cílem opakovaného experimentu bylo validovat závěry vyvozené na základě jednotlivých analýz prvního experimentu a tím eliminovat výskyt periodických čar na povrchu vzorků, které měly negativní vliv na samotnou kvalitu povrchu i na možnost sledovat vliv vybraných řezných podmínek na výslednou drsnost povrchu.

Výstupem prvního experimentu bylo tvrzení, že hlavním zdrojem vibrací, a s tím spojené tvorby viditelných čar (vlnitosti) na povrchu, bylo upnutí vzorku přes pryžové podložky. Tyto díky své pružnosti umožňovaly pohyb zejména v podélném směru natolik velký, že docházelo k "lokálnímu přebroušení" vzorku v momentě, kdy vzorek ustupoval proti směru posuvu a k "lokálnímu nedobroušení" v momentě, kdy byl vzorek akcelerován ve směru posunu. Výsledkem tohoto nízkofrekvenčního kmitání byla cyklická změna posuvové rychlosti a s ní spojená tvorba periodických čar.

Opakovaný experiment byl realizován při zachování všech podmínek prvního experimentu (stav experimentální soustavy), kromě způsobu upnutí vzorků. Gumové podložky byly zaměněny za plastové čelisti, které se pomocí magnetu uchycují do čelistí svěráku, jak je zachyceno na *Obr. 4.56*. Ověření závěrů prvního experimentu bylo realizováno na 3 vzorcích.



Obr. 4.56 Upnutí vzorku do plastových čelistí

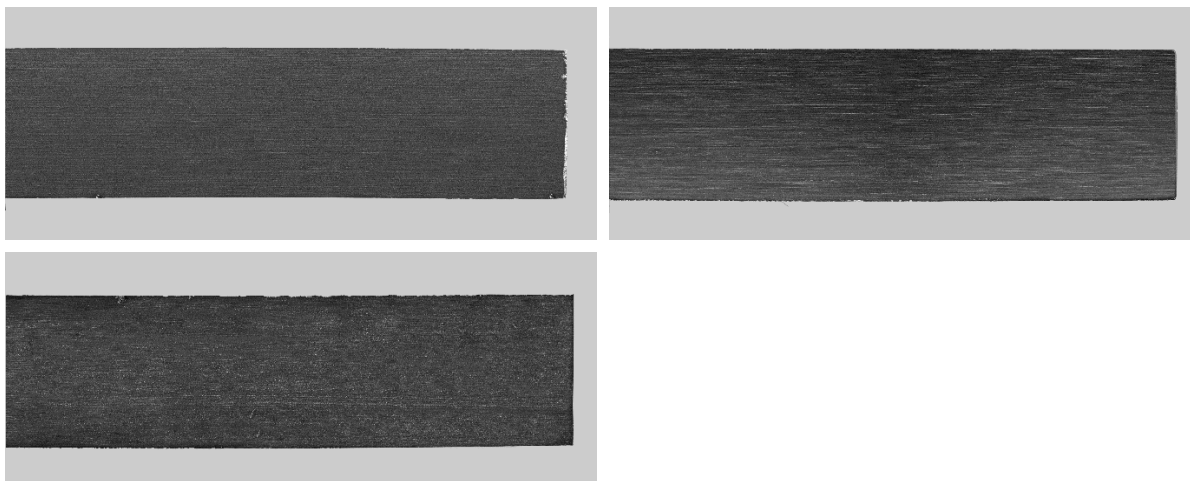
Přiřazené označení jednotlivých vzorků respektovalo systém zavedený při prvním broušení. Testovací vzorky z opakovaného broušení jsou uvedeny v *Tab. 4.15*. Cílem bylo s nejmenším možným počtem vzorků validovat různé kombinace řezných podmínek.

Tab. 4.15 B - Označení vzorků podle kombinace řezných podmínek

Řezná rychlost v_c [m/s]	Posuvová rychlost v_f [m/min]	Hloubka řezu a_e [mm]	Označení vzorku
23,1	6,25	0,01	1B_vc1_vf1_a1
		0,03	-
		0,05	-
		0,07	-
	11,39	0,01	-
		0,03	-
		0,05	4B_vc1_vf2_a3
		0,07	-
	16,84	0,01	-
		0,03	-
		0,05	-
		0,07	7B_vc1_vf3_a4

Optické hodnocení kvality povrchu

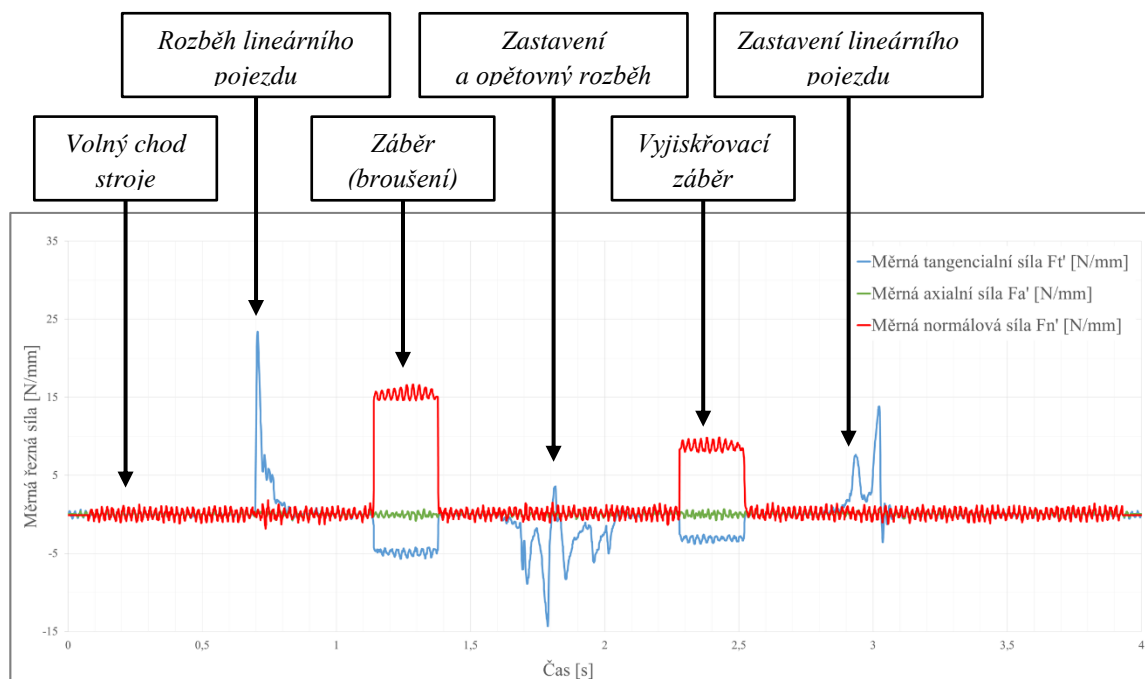
Subjektivně vnímaná kvalita povrchu byla bez viditelných čar při všech vzorcích (Obr. 4.57). Vlevo nahoře je zachycena vzorek **1B_vc1_vf1_a1**, vlevo dole vzorek **4B_vc1_vf2_a3** a vpravo nahoře je vzorek **7B_vc1_vf3_a4**. Žádné zásadní ani systematické vady se na povrchu nevyskytovaly. Detailnější zpracování a vyhodnocování kvality povrchu optickou metodou (pomocí strojového vidění) nebylo z důvodu rozlišení aparatury možné.



Obr. 4.57 Povrch tří vzorků po opakovaném testování

Hodnocení procesu broušení z pohledu silového zatížení

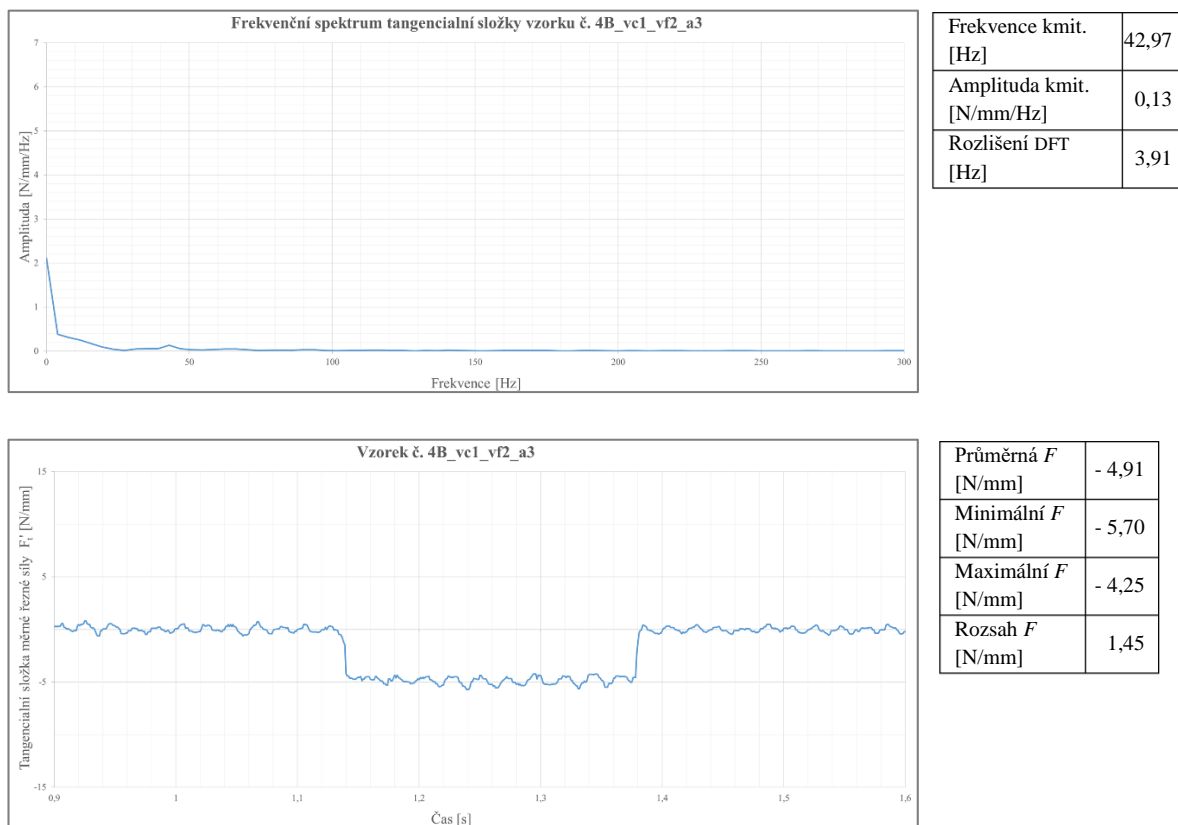
Grafický průběh působení jednotlivých složek řezné síly je demonstrován na *Obr. 4.58* náležející ke vzorku **4B_vc1_vf2_a3**. Z průběhu je zřejmé, že změnou upnutí vzorku byly výrazně potlačeny kmity v momentě záběru. Průměrná hodnota měrné řezné síly byla při všech vzorcích vyšší (2 - 3 krát) než hodnota zaznamenaná při prvním experimentu, rozsah působící síly, tedy amplituda kmitání byla ale násobně nižší, (více než 10 krát).



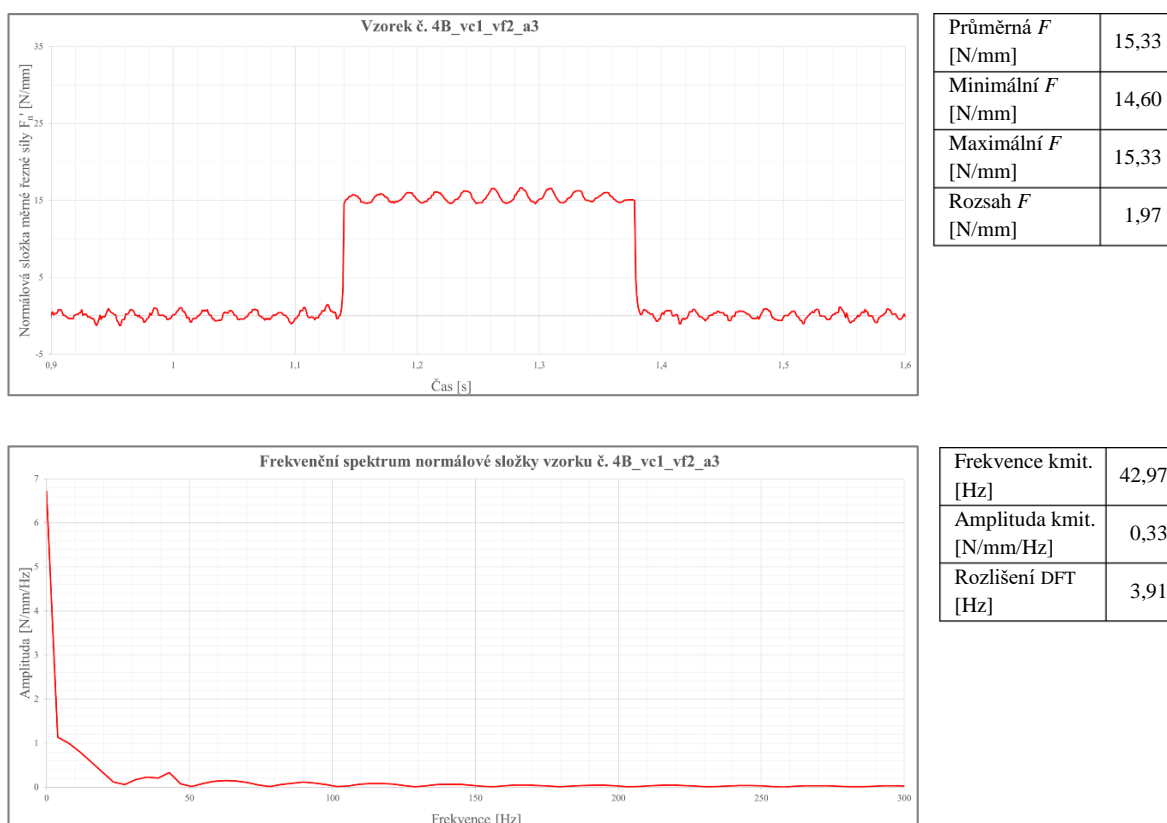
Obr. 4.58 Popis jednotlivých etap broušení

Frekvenční analýzou nasnímaných průběhů silového působení bylo zjištěno, že v systému brusky je stále přítomné kmitání na úrovni otáčkové frekvence nástroje. Toto kmitání je zaznamenáno i mimo moment záběru. Jeho střední hodnota je ale v čase ustálená a do spektra přispívá jen malou, i když měřitelnou energií. Jeho původ můžeme připisovat nedokonalému vyvážení rotačních hmot na konci vřetena. Na obrázku *Obr. 4.59* a *Obr. 4.60* je detailně zobrazen moment záběru i s číselným vyjádřením pro popisovaný vzorek **4B_vc1_vf2_a3**.

Shodné tendence byly pozorovány u všech tří testovaných vzorků. Vzájemný poměr složek řezné síly (normálové a tangenciální) dosahoval hodnoty přibližně rovno 3.



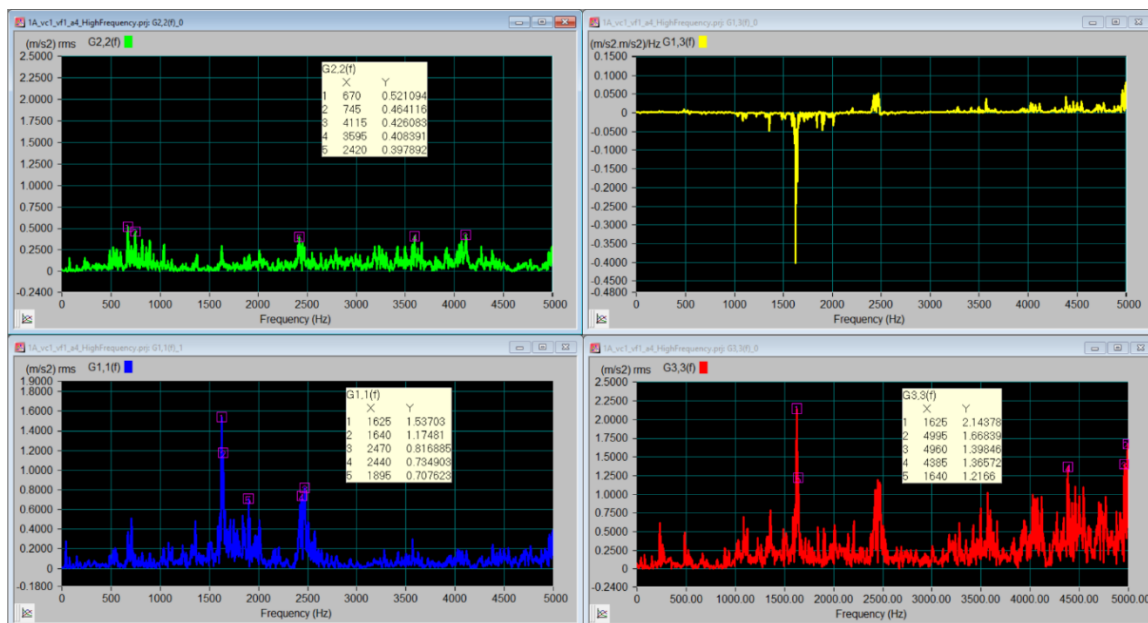
Obr. 4.59 Tangenciální složka měrné řezné síly v časové a frekvenční oblasti



Obr. 4.60 Normálová složka měrné řezné síly v časové a frekvenční oblasti

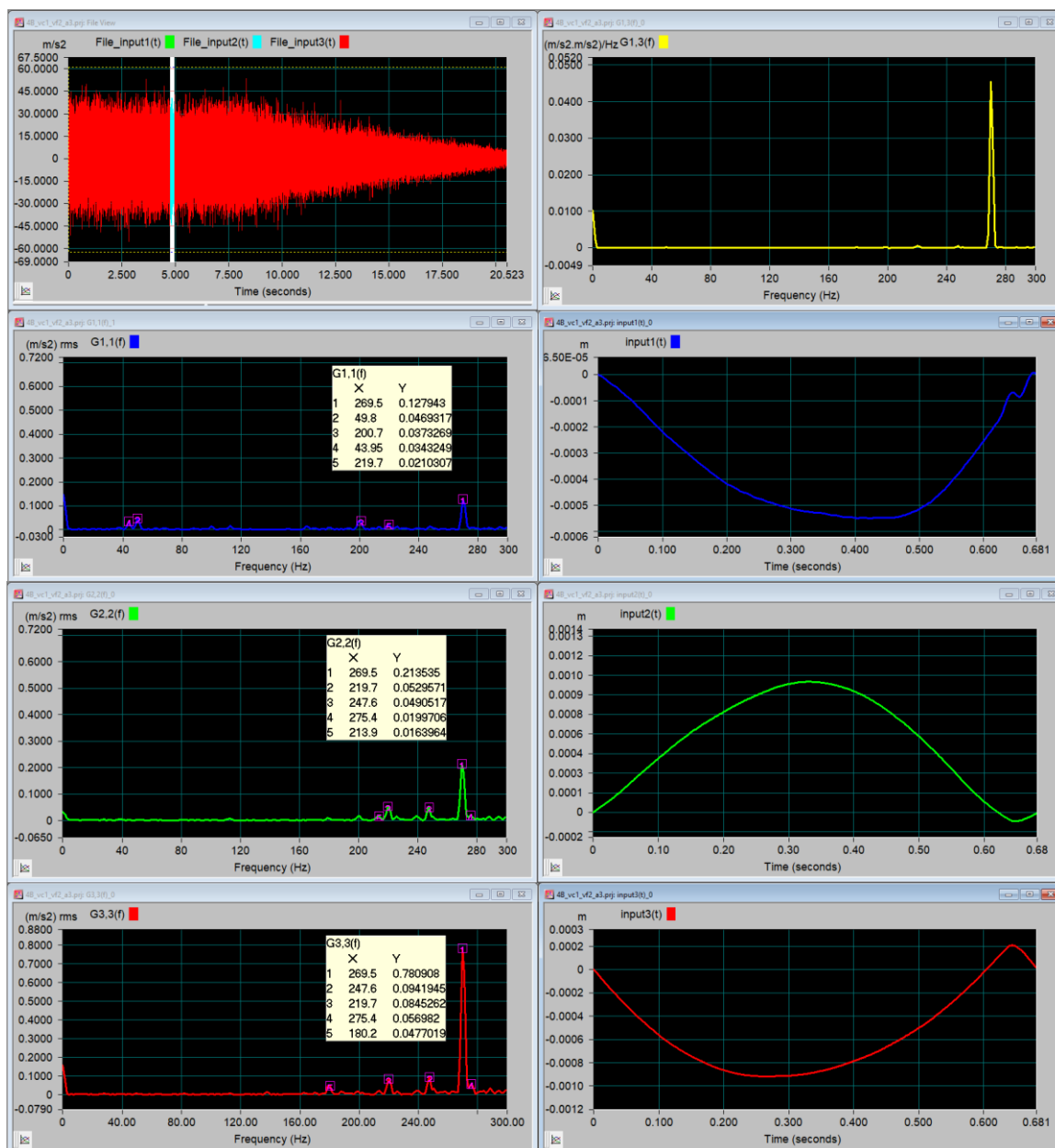
Hodnocení procesu broušení z pohledu vibrací

Základní analýzou vibrací získaných pomocí akcelerometru bylo i při opakovaném měření prokázáno, že maximální hodnoty vibrací (frekvence s největší energií) se nacházejí v oblasti kolem 1900 Hz a 2900 Hz, které jsou vlastní chodu brusky. Změna upnutí vzorku nebyla při širokfrekvenční analýze zaznamenána, což dokazují grafy na *Obr. 4.61*.



Obr. 4.61 Širokfrekvenční analýza vibrací stroje

Při detailním zkoumání oblasti 0 až 300 Hz byl, v souladu s daty z dynamometru, zaznamenán výrazný pokles výkonu otáčkové frekvence, její přítomnost je ale stále viditelná. Téměř na hranici měřitelnosti poklesly i vyšší harmonické otáčkové frekvence a také několik parazitních frekvencí, které se při prvním měření v nízkofrekvenčním pásmu objevovaly. Stále však platí, že v pásmu do 300 Hz má bez ohledu na řezné podmínky největší vliv frekvence na úrovni 266 - 270 Hz, působící ve směru osy Z, která násobně převyšuje ostatní složky a v momentě záběru se mechanicky přenáší i do zbývajících směrů. Z časového průběhu dráhy, získané dvojitou integrací zrychlení, bylo změnou upnutí odstraněno zvlnění, pozorované při prvním broušení. Průběhy popisující vibrace při obrábění vzorku **4B_vc1_vf2_a3** jsou na obrázku *Obr. 4.62*.



Obr. 4.62 Frekvenční spektra a průběhy dráhy v osách X, Y a Z pro vzorek 4B_vc1_vf2_a3

Kvalita povrchu z pohledu jeho drsnosti

Na vzorcích opakovaného experimentu byly změřeny hodnoty drsnosti povrchu Ra a Rz pomocí kontaktního profiloměru. Měření v rámci vzorku bylo realizováno na 5 místech, vždy v axiálním směru. Zaznamenané hodnoty a z nich vypočtené základní statistické ukazatele jsou uvedeny v Tab. 4.16.

Tab. 4.16 Změřené parametry drsnosti povrchu při opakovaném testování

VZOREK		SLEDOVANÉ VELIČINY		STATISTICKÉ UKAZATELE			
Označení	Č. měření	Ra [μm]	Rz [μm]	Průměrné Ra [μm]	Standardní odchylka Ra [μm]	Průměrné Rz [μm]	Standardní odchylka Rz [μm]
1B_vc1_vf1_a1	1	0,2848	2,4710	0,267	0,037	2,469	0,048
	2	0,3271	2,5348				
	3	0,2387	2,4023				
	4	0,2616	2,5079				
	5	0,2221	2,4311				
4B_vc1_vf2_a3	1	0,3217	3,2170	0,327	0,041	3,210	0,019
	2	0,3414	3,1860				
	3	0,2548	3,2408				
	4	0,3329	3,1961				
	5	0,3824	3,2113				
7B_vc1_vf3_a4	1	0,4951	3,9720	0,492	0,047	3,985	0,039
	2	0,4652	4,0341				
	3	0,4195	3,9218				
	4	0,5576	3,9804				
	5	0,5201	4,0175				

Ze získaných náměrů, pro jejich malou četnost, není možné vyhodnotit přímý vliv řezných podmínek na sledované parametry kvality povrchu, ale výsledky naznačují dostatečnou stabilitu, bez zásadního vlivu vlnitosti povrchu nebo místa měření. Hodnoty dosahují očekávanou úroveň. Pozorovatelný základní trend naplňuje očekávání, kdy se zvyšující se posuvovou rychlostí a hloubkou záběru hodnoty Ra a Rz rostou.

4.5 Diskuse výsledků a perspektiva dalších prací

Výsledky získané experimentálně potvrzují skutečnosti uvedené v kapitole 3.1.5, v souladu s [7]. Konvenční výrobní prostředky, použité pro uvedený experiment nejsou, v různých ohledech, optimální pro obrábění součástí z keramického materiálu. Jednotlivé součásti technologické soustavy by měly být přizpůsobeny tak, aby byl zmírněn (případně odstraněn) dopad nestability procesu na výsledný povrch součásti (zkušební vzorku).

Obecně lze konstatovat, že keramické díly je vhodné opracovávat na strojích, které jsou k tomuto účelu již konstrukčně uzpůsobeny. Rám stroje i všechny jeho součásti (vřeteno, pojezdy) musí mít výjimečně vysokou statickou i dynamickou tuhost. Testování prokázalo, že vliv vibrací různého charakteru má zásadní vliv na povrch součástí z keramiky, což je z hlediska materiálových vlastností keramiky kritické pro její celkovou pevnost, respektive pevnost keramických součástí. V souvislosti s tím, musí být technologická soustava osazena systémy pro monitorování celého procesu broušení, a to trvale. V průběhu experimentu byly za účelem monitorování procesu (vibrace, síly) využity externí senzory mobilního charakteru, vzhledem k tomu, že stroj BHP320A není standardně takovými systémy vybaven. Soustavné sledování a vyhodnocování procesu broušení umožní v každém okamžiku zasáhnout do procesu a předejít tak případnému poškození povrchu dílu. Jak bylo uvedeno v teoretické části, pro výkonné obrábění keramiky je vhodné hloubkové broušení (s velkou hloubkou záběru), často v kombinaci s vysokými reznými rychlostmi a také „rázové broušení“, při kterém se využívá vysoká rychlost posuvu. Stroje musí být schopny zvládnout tyto náročné podmínky úběru celého přídatku v jednom kroku a musí být schopny kontrolovat zrychlování a zpomalování vysokého posuvu bez nadměrných vibrací. Stroj BPH320A je konvenčního charakteru a není zcela možné na něm vytvořit podmínky odpovídající potřebám broušení keramických vzorků. Pro další testování je vhodné buď do možné úrovně adaptovat technologické podmínky broušení a měření, nebo přímo změnit místo testování.

Jak se ukázalo během experimentu, je zcela zásadní zvolit vhodný způsob upnutí keramických součástí. Během experimentu byl k dispozici strojní svěrák. První předpoklad, že čelisti svěráku jsou dostatečně rovné, nebyl potvrzen při testovacím broušení, proto byly do čelistí vloženy tvrdé gumové podložky. Tento krok se ukázal být fatální pro další testování, protože nedostatečná tuhost tohoto uložení způsobila kmitání v místě upnutí. Toto kmitání bylo detekováno jednak vizuálně (přítomností vlnitosti na povrchu vzorku) a pomocí aparatury na měření vibrací bylo následně určen a potvrzen tento zdroj. Vzhledem k tomu, že jiný typ upínače nemohl být využit, bylo upnutí adaptováno pro potřeby validace předpokládaného zdroje vlnitosti. Čelisti svěráku byly opatřeny plastovými podložkami, které snížili možnost poškození vzorku v důsledku lomu, ale zároveň zabezpečily dostatečně tuhé uložení. Opakované přeměření na třech vzorcích potvrdilo, že nová volba upnutí byla vhodná pro potřeby dalšího testování v laboratořích ÚST. Dalším studiem této problematiky bylo zjištěno, že právě tato metoda je jedním z vhodných způsobů upnutí rovinných keramických obrobků. Obecné požadavky na upínání keramiky tedy jsou:

- vyhnout se lokálnímu namáhání dílů buď nedostatečnou paralelitou upínače, nebo přítomností vrcholů, které vyvolají lokální tlak na součást,
- zabezpečit vysoké upínací síly, v souladu s první podmínkou,
- dosáhnout vysoké přesnosti upnutí s cílem zabezpečit požadované tolerance dílů,
- snadné ovládání, případně automatizace,
- dostatečná flexibilita, zejména pro složité dílce.

Na rozdíl od kovů je keramika omezeně deformována pružně až do porušení lomem a většina keramických materiálů není magnetická. Proto není možné u keramiky počítat s magnetickým způsobem upínání (případně je nutné ho doplnit o další způsob fixování obrobku). Pro vnější a vnitřní broušení do kulata se nejčastěji užívají vícečelistřová sklíčidla. Obrobky s rovnoběžnými stěnami se upínají do svěráku, jehož čelisti musí být povlakovány měkčím materiálem, jako například hliník nebo plast. Mezi vhodné způsoby upínání patří také vakuové upínání, nebo upínání přimražením.

Výsledky z jednotlivých měřicích zařízení použitých při testování jsou analyzovány v textu. Obecně potvrzují skutečnosti uvedené výše ke způsobu upnutí vzorků a jsou ovlivněny kmitáním vzorku v průběhu broušení. Není tedy možné z nich vyvozovat další závěry týkající se vlivu řezných podmínek na proces a parametry struktury povrchu. V kapitole 4.3.3 jsou uvedeny výsledky měření drsnosti povrchu. Hodnoty parametrů R_a a R_z jsou na očekávatelné úrovni, ale byly ovlivněny nejen vstupními řeznými podmínkami, ale také místem měření na vzorku. První série testovaných vzorků tedy nemohla být využita k realizaci vytyčených cílů.

Opakované ověřovací testování již poskytlo výrazně lepší výsledky, které jsou v souladu s původní hypotézou, že se zvyšující se posuvovou rychlostí a hloubkou záběru hodnoty R_a a R_z rostou a klesají se zvýšením řezné rychlosti. Jednotlivé hodnoty parametrů jsou si ovšem velmi blízké a i tento výsledek potvrzuje, že drsnost povrchu není u SiC na změnu řezných podmínek tak citlivá jako u kovů. Tyto výsledky se již zdají být důvěryhodné a na jejich základě je možné vystavět další experimentální práce.

Vzhledem k tomu, že primární cíl práce nebyl zcela naplněn, je nutné, na základě aktuálních zjištění, opakovat experiment v plném rozsahu. Je třeba zvážit, do jaké míry je možné laboratorní podmínky adaptovat pro potřeby testování keramických materiálů. Prvním krokem a vhodným doporučením dalšího postupu by měla být vibrační diagnostika stroje BPH320A. Z výsledků vibrační analýzy vyplývá, že se ve spektru objevují frekvence, které je třeba lokalizovat a posoudit jejich vliv na proces broušení. Jedná se zejména o frekvenci 266 až 270 Hz v oblasti nízkých frekvencí, viz popis ve výsledcích a vysoké nosné frekvence na úrovni přibližně 1920 Hz, 2880 Hz a 4750 Hz. Z aktuálních dat není možné zdroje identifikovat, je na místě provést samostatné testování.

Výsledky testování dále naznačují, že mezi nominálními otáčkami stroje (které jsou dány dokumentací ke stroji BPH320A) a skutečnými změřenými otáčkami může být rozdíl. Pro analyzovaný vzorek $1A_vc1_vf1_a3$ byla vypočtena nominální otáčková frekvence $f_{s1}=42,03$ Hz. Naměřená frekvence byla 43,95 Hz. Tuto nosnou frekvenci vykazovaly všechny vzorky příslušející řezné rychlosti v_{c1} . Rozdíl na úrovni 4,5% lze připisovat

nedostatečnému rozlišení FFT analýzy a/nebo reálně rychlejšími otáčkami vřetena, které nebyly žádným způsobem ověřeny.

Problém týkající se upínání vzorků byl vyřešen použitím plastových čelisti a zdá se tedy vhodné, tento způsob upínání zachovat.

Dále je třeba zvážit fakt, že brousicí kotouč nebyl během testování orovnáván. Jak se uvedeno v kapitole 3.1.4, není orovnávání, případně i vyvažování diamantových brousících kotoučů jednoduchou záležitostí. Brusky by měly být vybaveny vestavěným zařízením pro vyvažování během procesu a u diamantového kotouče by měla být možnost opravit tvar i provést ostření. Laboratoř není zatím vybavena vhodným zařízením, proto je nutné zvážit jak tvar kotouče zachovávat.

Monitoring procesu je možné dále provádět pomocí profesionálních přístrojů Kistler a Brüel & Kjær, které jsou na ÚST k dispozici a patří ke špičce ve svém oboru.

Vzhledem k technologickým možnostem stroje není možné příliš změnit testovací režné podmínky. Je ovšem možné je, na základě původních výsledků, předem vhodně naplánovat, například pomocí nástroje *plánování experimentu DOE*. Je také nutné zvýšit četnost výsledků a provést opakování tak, aby bylo další statistické zpracování relevantní.

Cíle dalších prací je vhodné rozšířit o komplexní zhodnocení integrity povrchu zkoušených vzorků po broušení. Vzhledem k materiálovým vlastnostem keramiky a jejich náchylnosti k tvorbě trhlin je vhodné přítomnost, druh a počet trhlin po broušení vyhodnotit na rastrovacím elektronovém mikroskopu. Zhodnocení povrchových a podpovrchových trhlin v závislosti na kmitání vzorku, je vhodné realizovat i u původních vzorků.

Závěr

Pokročilé keramické materiály, ať už ve formě objemových těles nebo ve formě silných vrstev či povlaků, se stále častěji prosazují v oblasti tzv. špičkových technologií, kde by i vysoce kvalitní kovové materiály byly na hranici svých možností. Toto použití vyžaduje produkovat součásti s vysokou jakostí funkčních ploch. Proto je důležité soustředit pozornost na výrobní procesy a jejich vliv na kvalitu funkčních povrchů. Největší překážkou konvenčního obrábění keramiky, jsou paradoxně právě její vlastnosti. Vysoká tvrdost a nízká lomová houževnatost. Keramické materiály jsou tedy inherentně křehké a při zatížení vykazují žádné, nebo velmi nízké hodnoty plastické deformace.

Disertační práce je z hlediska metody obrábění zaměřena na broušení diamantovým kotoučem a z hlediska obráběného materiálu na karbid křemíku SiC. Jedná se o materiál, který díky svým vynikajícím vlastnostem (vysoká tvrdost, nízká měrná hmotnost, vysoká pevnost za horka, odolnost vůči otěru, atd.) nachází uplatnění při konstrukci strojních součástí. Stěžejní je zde otázka celkové kvality povrchu součástí po broušení a znalost faktorů, které mají na kvalitu povrchu vliv. Primárním cílem práce bylo popsat závislost mezi základními parametry popisující drsnost povrchu (R_a , R_z) a řeznými podmínkami.

Teoretická část práce rozsáhle mapuje aktuální stav poznání v oblasti metod obrábění keramiky. Dále je podrobně popsána technologie broušení keramiky diamantovými broušícími kotouči. Stěžejní informace týkající se broušení keramiky byly nastudovány a vybrány z mnoha rozsáhlých, věrohodných zdrojů, pečlivě sestaveny a vyloženy. Vznikl tak soubor vědecko-technologických informací, které je možné široce využít. Použity byly zejména zahraniční publikace. V tuzemských podmínkách je možné jen velmi omezeně nalézt takto ucelený přehled týkající se uvedené problematiky. Vzhledem k dalším cílům práce byla zapracována též témata měření řezných sil, vibrací a parametrů struktury povrchu při broušení.

Experimentální broušení bylo realizováno v laboratořích Ústavu strojírenské technologie, FSI VUT v Brně na rovině vodorovné brusce JUNKER BPH 320A, která dobře reprezentuje dnes používaný průmyslový standard, avšak pro konvenční broušení kovových materiálů. Jako nástroj byl použit diamantový broušící kotouč typ 6-2-2-175-20 / 2 B-XV D107 K100. Výrobní stroj byl pro potřeby analýzy osazen moderními monitorovacími systémy. Pro měření silového zatížení byl použit piezoelektrický dynamometru Kistler 9257B s nábojovým zesilovačem 5070. Měření vibrací bylo zaznamenáváno pomocí Trios CCLD akcelerometru Brüel & Kjaer 4525B a signálového analyzátoru Photon od téhož výrobce. Na vizuální hodnocení byl v dalších etapách experimentu využit systém strojového vidění se softwarem Halcon. Měřicí systémy hodnocení stavu povrchu vzorků po broušení zastoupil kontaktní profiloměr Talysurf Intra od firmy Taylor Hobson a bezkontaktní optický profiloměr IFM G4 od firmy Alicona. Testováno bylo 24 kombinací řezných podmínek, kdy byla měněna řezná rychlost, hloubka záběru i rychlost posunu.

Experimentální část práce od svého začátku poukazovala na značné rozdíly v přístupu mezi obráběním keramických a klasických, převážně kovových, materiálů. Jelikož materiál SiC je nemagnetický, k upnutí do stroje byl použit standardní strojní svěrák. Z důvodu křehkého charakteru obráběného materiálu ale došlo při upnutí testovacího vzorku do svěráku k jeho prasknutí, a to opakovaně. Pravděpodobnou příčinou byly nedokonalé upínací plochy svěráku, jejichž nedostatečná vzájemná rovnoběžnost a tím vznikající napětí způsobily destrukci křehkého keramického vzorku. Proto byly pro upnutí použity tvrdé gumové podložky, které kompenzovaly nerovnoměrný tlak svěráku a umožnily tak dostatečně pevné upnutí vzorků. Při broušení se na povrchu vzorků objevovaly kontrastní, okem viditelné, periodické čáry, které naznačovaly systematickou chybu v procesu a přítomnost značných vibrací. Speciální pozornost proto byla věnována kontrole tvaru a upnutí, resp. vyvážení brousicího kotouče. Měření vyloučilo nástroj jako zdroj chyby. Nad rámec předpokládaných cílů se stěžejní částí experimentální práce stala problematika přítomnosti vibrací v procesu broušení. Při studiu souvisejících děl, řešení a analýze výsledků se ukázalo, že právě toto téma je pro broušení keramiky zásadní a není mu ve světovém měřítku věnováno příliš pozornosti.

Při analýze silového zatížení byl při všech dalších vzorcích pozorován periodický charakter působící řezné síly s velkou amplitudy vibrací. Bylo prokázáno, že působení axiální složky řezné síly je prakticky nulové, což korespondovalo s očekávaným charakterem procesu broušení. Působící řezná síla rostla s hloubkou radiálního záběru. Amplituda kmitání řezné síly rostla úměrně s hloubkou záběru jen po určitou hodnotu, při které došlo k nasycení systému, a dále se amplituda kmitů nezvyšovala nebo rostla jen velmi pomalu. Z další analýzy silového působení byla určena frekvence kmitání. Bylo zjištěno, že frekvence kmitání je přímo úměrná řezné rychlosti a že amplituda kmitání je nepřímo úměrná posuvové rychlosti. Stejně nepřímo úměrný je i vztah mezi řeznou rychlostí a amplitudou kmitání. Z uvedeného plyne, že čím vyšší jsou pracovní rychlosti (otáčky nástroje a rychlost lineárního posunu stolu brusky), a čím menší je radiální záběr, tím je intenzita problematického kmitání menší. Z analýzy silového působení v procesu broušení ale nebylo možné jednoznačně identifikovat zdroj kmitání. Frekvence kmitání řezné síly byla při všech měřeních blízka otáčkové frekvenci nástroje.

Na základě zjištění z analýzy silového působení byla vibrační analýza zaměřena na nízkofrekvenční oblast, řádově do 300Hz. Byla potvrzena přítomnost výrazného kmitání blízkého otáčkové frekvenci nástroje a jeho vyšších harmonických složek. Transformací záznamu akcelerace vibrací na dráhu bylo možné určit, že zdrojem kmitání je upnutí vzorků přes přídavné gumové podložky. Ty umožňovaly malý, ale měřitelný pohyb vzorků v podélném směru, v důsledku čehož docházelo k periodické změně posuvové rychlosti a tím vzniku čar a vlnitosti na povrchu vzorků.

Výsledky regresní analýzy vykazovaly velmi nízký koeficient determinace a naznačovaly tak nezávislost pozorovaných parametrů drsnosti povrchu na řezných podmínkách. Hodnocení kvality povrchu však bylo zásadně ovlivněno přítomností vibrací

v procesu broušení a malou objektivitou kontaktní metody měření drsnosti.

Opakovaný experiment potvrdil na menším počtu vzorků závěry hlavního experimentu. Gumové podložky byly zaměněny za plastové čelisti. Výskyt periodických čar na povrchu byl zcela potlačen. Ze získaných náměrů, pro jejich malou četnost, nebylo možné vyhodnotit přímý vliv řezných podmínek na sledované parametry kvality povrchu, ale výsledky naznačují dostatečnou stabilitu, bez zásadního vlivu vlnitosti povrchu nebo místa měření. Pozorovatelný základní trend naplňuje očekávání, kdy se zvyšující se posuvovou rychlostí a hloubkou záběru hodnoty Ra a Rz rostou.

Komplexní pochopení procesu broušení keramických materiálů má jednoznačně interdisciplinární charakter a vyžaduje výzkum a poznání z oboru strojního obrábění, mechaniky, metrologie a zpracování signálu. Ukázalo se, že úskalí, které jsou při obrábění klasických materiálů téměř úplně zvládnuty, představují při obrábění keramiky nové výzvy. Dobrým příkladem je například i fakt, že v odborné literatuře zaměřené na efektivní obrábění keramických materiálů je zpravidla problematice upínání věnován jen marginální prostor. Přitom přítomnost vibrací v procesu broušení má zásadní vliv na kvalitu povrchu keramických dílů. Proto je nejdříve nutné uvést technologický systém do stabilního stavu a následně provádět testování, jehož výsledky relevantně popisují vliv technologických podmínek na integritu povrchu.

V závěrečné části práce byl relativně velký prostor věnován diskuzi výsledků, kde je zahrnuta rovněž perspektiva budoucích experimentálních prací a také z ní vyplývá význam výsledků vzhledem k realizaci v praxi a praktická doporučení.

Seznam použité literatury

- [1] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 8072042483.
- [2] MACA, K. *Slinování pokročilých keramických materiálů: Sintering of advanced ceramic materials : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Materiálové vědy a inženýrství*. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 9788021440999.
- [3] GREGOROVÁ, E. a W. PABST. *Technologie keramiky – 8. Oxidová keramika* [online]. 1. Praha: VŠCHT Praha, Ústav skla a keramiky, 2007 [cit. 2017-06-08]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-8-C.pdf
- [4] GREGOROVÁ, E. a W. PABST. *Technologie keramiky – 9. Neoxidová keramika* [online]. 1. Praha: VŠCHT Praha, Ústav skla a keramiky, 2007 [cit. 2017-06-08]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-9-C.pdf
- [5] Advanced Ceramics Market - Segmented by Type, End-User Industry, and Geography - Growth, Trends, and Forecast (2018 -2023). *Mordor Intelligence* [online]. Hyderabad, India: Mordor Intelligence, 2016 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/advanced-ceramics-market>
- [6] Vazby v krystalech. *Encyklopedie fyziky* [online]. Jaroslav Reichl, Martin Všeticka, 2018 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/628-vazby-v-krystalech>
- [7] MARINESCU, I., T. DOI a E. UHLMANN. *Handbook of ceramics grinding and polishing*. 2nd. Boston, MA: Elsevier, 2014. ISBN 9781455778584.
- [8] Keramické materiály v řezném procesu. HUMÁR, A. *Studium fyzikálně chemických vlastností keramických materiálů pro strojírenství: Výzkumná zpráva úkolu SPZV IV-4-5/04*. 1. vyd. Brno, 1990, Kapitola III.
- [9] JAHANMIR, S, M RAMULU a P KOSHY. *Machining of ceramics and composites*. 1. New York: Marcel Dekker, 1999. ISBN 082470178x.
- [10] YIN, L., E. VANCOILLE, L. LEE, H. HUANG, K. RAMESH a X. LIU. High-quality grinding of polycrystalline silicon carbide spherical surfaces. *Wear* [online]. 2004, **256**(1-2), 197-207 [cit. 2017-06-08]. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00406-X. ISSN 00431648. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004316480300406X>

- [11] ZHONG, Z. Surface finish of precision machined advanced materials. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2002, **122**(2-3), 173-178 [cit. 2017-06-08]. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00076-6. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602000766>
- [12] BRINKSMEIER, E., Y. MUTLUGÜNES, F. KLOCKE, J. AURICH, P. SHORE a H. OHMORI. Ultra-precision grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2010, **59**(2), 652-671 [cit. 2017-06-08]. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.001. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850610001885>
- [13] MARINESCU, I. *Handbook of advanced ceramics machining*. 1. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 0849338379.
- [14] SREEJITH, P. a B. NGOI. Material removal mechanisms in precision machining of new materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2001, **41**(12), 1831-1843 [cit. 2017-06-08]. DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00014-1. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695501000141>
- [15] HUANG, H. High Speed Grinding of Advanced Ceramics: A Review. *Key Engineering Materials* [online]. 2009, **404**, 11-22 [cit. 2017-06-08]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.404.11. ISSN 16629795. Dostupné z: <http://www.scientific.net/KEM.404.11>
- [16] NI, J., B. LI a J. PANG. A Practical Study on the Surface Integrity of High-Speed Cylindrical Grinding of SiC. *Materials Science Forum* [online]. 2012, **723**, 202-207 [cit. 2017-06-08]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.723.202. ISSN 16629752. Dostupné z: <http://www.scientific.net/MSF.723.202>
- [17] DAI, S., Y. REN, T. KONG a Y. HU. Research on Ultra-Precision Machining of Silicon Nitride Ceramics: A Review. *Advanced Materials Research* [online]. 2012, **497**, 294-298 [cit. 2017-06-08]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.497.294. ISSN 16628985. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.497.294>
- [18] OHMORI, H. a T. NAKAGAWA. Analysis of Mirror Surface Generation of Hard and Brittle Materials by ELID (Electronic In-Process Dressing) Grinding with Superfine Grain Metallic Bond Wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 1995, **44**(1), 287-290 [cit. 2017-06-08]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62327-0. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607623270>

- [19] RAHMAN, M., A. KUMAR, H. LIM a K. FATIMA. Nano finish grinding of brittle materials using electrolytic in-process dressing (ELID) technique. *Sadhana* [online]. 2003, **28**(5), 957-974 [cit. 2017-06-08]. DOI: 10.1007/BF02703325. ISSN 02562499. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02703325>
- [20] LIU, J., Z. PEI a G. FISHER. ELID grinding of silicon wafers: A literature review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2007, **47**(3-4), 529-536 [cit. 2017-06-08]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.06.001. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089069550600143X>
- [21] WEGENER, K., H. HOFFMEISTER, B. KARPUSCHEWSKI, F. KUSTER, W. HAHMANN a M. RABIEY. Conditioning and monitoring of grinding wheels. *CIRP Annals* [online]. 2011, **60**(2), 757-777 [cit. 2018-08-08]. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.05.003. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850611002058>
- [22] SAMAL, S. *Study of Parameters of Ultrasonic machining* [online]. Rourkela, 2009 [cit. 2017-06-08]. Dostupné z: http://ethesis.nitrkl.ac.in/1013/1/submit_thesis.pdf. Disertační práce. National Institute Of Technology, Department of Mechanical Engineering. Vedoucí práce Dr. B. K. Nanda.
- [23] THOE, T., D. ASPINWALL a M. WISE. Review on ultrasonic machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 1998, **38**(4), 239-255 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/S0890-6955(97)00036-9. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695597000369>
- [24] DAM, H., P. QUIST a M. SCHREIBER. Productivity, surface quality and tolerances in ultrasonic machining of ceramics. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 1995, **51**(1-4), 358-368 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/0924-0136(94)01587-Q. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/092401369401587Q>
- [25] PEI, Z., P. FERREIRA a M. HASELKORN. Plastic flow in rotary ultrasonic machining of ceramics. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 1995, **48**(1-4), 771-777 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/0924-0136(94)01720-L. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/092401369401720L>
- [26] HUMÁR, A. *Technologie I: Technologie obrábění – 3. část* [online]. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 57 s. [cit. 2017-06-08]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf

- [27] CHURI, N. *Rotary Ultrasonic Machining of Hard-To-Machine Materials* [online]. Manhattan, Kansas, 2010 [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <http://krex.k-state.edu/dspace/bitstream/2097/2509/1/NikhilChuri2010.pdf>. Disertační práce. Kansas State University, College of Engineering, Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering. Vedoucí práce Dr. Zhijian Pei.
- [28] LIU, D., W. CONG, Z.J. PEI a Y. TANG. A cutting force model for rotary ultrasonic machining of brittle materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2012, **52**(1), 77-84 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.09.006. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695511001751>
- [29] PEI, Z. a P. FERREIRA. An experimental investigation of rotary ultrasonic face milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 1999, **39**(8), 1327-1344 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00093-5. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695598000935>
- [30] LI, Z., L-W. CAI, Z. PEI a C. TREADWELL. Edge-chipping reduction in rotary ultrasonic machining of ceramics: Finite element analysis and experimental verification. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2006, **46**(12-13), 1469-1477 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.002. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505002610>
- [31] ZENG, W., X. XU a Z. PEI. Experimental Investigation of Tool Wear in Rotary Ultrasonic Machining of Alumina. *Key Engineering Materials* [online]. 2009, **416**, 182-186 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.416.182. ISSN 16629795. Dostupné z: <http://www.scientific.net/KEM.416.182>
- [32] HU, P., J. ZHANG, Z. PEI a C. TREADWELL. Modeling of material removal rate in rotary ultrasonic machining: designed experiments. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2002, **129**(1-3), 339-344 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00686-6. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602006866>
- [33] PEI, Z., D. PRABHAKAR, P. FERREIRA a M. HASELKORN. Rotary Ultrasonic Drilling and Milling of Ceramics. In: *The Design for Manufacturability and Manufacture of Ceramic Components Symposium*. Indianapolis: American Ceramic Society 96th Annual Meeting, 1994. ISBN 0053110016.

- [34] PEI, Z., P. FERREIRA, S. KAPOOR a M. HASELKORN. Rotary ultrasonic machining for face milling of ceramics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 1995, **35**(7), 1033-1046 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/0890-6955(94)00100-X. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/089069559400100X>
- [35] ZENG, W., X. XU a Z. PEI. Rotary Ultrasonic Machining of Advanced Ceramics. *Materials Science Forum* [online]. 2006, **532-533**, 361-364 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.532-533.361. ISSN 16629752. Dostupné z: <http://www.scientific.net/MSF.532-533.361>
- [36] ZHANG, Y., Y. TANG a X. LIU. Research on Ultrasonic Vibration Combined with Grinding Machining and its Application in Processing Brittle Hard Materials. *Key Engineering Materials* [online]. 2010, **447-448**, 223-227 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.447-448.223. ISSN 16629795. Dostupné z: <http://www.scientific.net/KEM.447-448.223>
- [37] LIU, L., B. LIN a F. FANG. Monitoring of Tool Wear in Rotary Ultrasonic Machining of Advanced Ceramics. *Advanced Materials Research* [online]. 2011, **314-316**, 1754-1759 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.314-316.1754. ISSN 16628985. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.314-316.1754>
- [38] KHOO, C., E. HAMZAH a I. SUDIN. A Review on the Rotary Ultrasonic Machining of Advanced Ceramics. *Jurnal Mekanikal*. 2008, (25), 9–23. ISSN 0127-3396.
- [39] Complete machining with enhanced ULTRASONIC 20 linear from DMG MORI: High performance ceramic machining. In: *Machiningnews.com* [online]. CNCMedia Ltd., 2016 [cit. 2018-06-11]. Dostupné z: <http://www.machiningnews.com/2016/03/complete-machining-with-enhanced-ultrasonic-20-linear-from-dmg-mori/>
- [40] *Flow international demonstrates accurate waterjet cutting at Mfg4* [online]. Kent (Washington): Flow International Corporation, 2012 [cit. 2012-08-25]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.com/>
- [41] WANG, W. Energy Conservation Study during Abrasive Water Jet Cutting. *Advanced Materials Research* [online]. 2011, **311-313**, 1673-1676 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.311-313.1673. ISSN 16628985. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.311-313.1673>

- [42] ALBERDI, A., A. RIVERO, A. CARRASCAL a A. LAMIKIZ. Kerf Profile Modelling in Abrasive Waterjet Milling. *Materials Science Forum* [online]. 2012, **713**, 91-96 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.713.91. ISSN 16629752. Dostupné z: <http://www.scientific.net/MSF.713.91>
- [43] FENG, Y., Ch. HUANG, X. LIU a B. HE. The Depth Model for Abrasive Waterjet Milling of Ceramic Materials. *Advanced Materials Research* [online]. 2012, **500**, 242-248 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.500.242. ISSN 16628985. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.500.242>
- [44] CHEN, T. a Ch. WANG. Investigation into Roughness of Surface Polished by Abrasive Waterjet with Taguchi Method and Dimensional Analysis. *Materials Science Forum* [online]. 2012, **723**, 188-195 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.723.188. ISSN 16629752. Dostupné z: <http://www.scientific.net/MSF.723.188>
- [45] KARAKURT, I., D. AYDIN a K. AYDINER. Analysis of the Kerf Angle of the Granite Machined by Abrasive Waterjet (AWJ). *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* [online]. 2011, **18**, 435-442 [cit. 2017-06-09]. ISSN 0975-1017. Dostupné z: <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/13600/1/IJEMS%2018%286%29%20435-442.pdf>
- [46] SIORES, E., W. WONG, L. CHEN a J. WAGER. Enhancing Abrasive Waterjet Cutting of Ceramics by Head Oscillation Techniques. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 1996, **45**(1), 327-330 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63073-X. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000785060763073X>
- [47] XU, S. a J. WANG. A study of abrasive waterjet cutting of alumina ceramics with controlled nozzle oscillation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2006, **27**(7-8), 693-702 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1007/s00170-004-2256-7. ISSN 02683768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-004-2256-7>
- [48] WANG, J. The Effects of the Jet Impact Angle on the Cutting Performance in AWJ Machining of Alumina Ceramics. *Key Engineering Materials* [online]. 2003, **238-239**, 117-124 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.238-239.117. ISSN 16629795. Dostupné z: <http://www.scientific.net/KEM.238-239.117>
- [49] GUDIMETLA, P., J. WANG a W. WONG. Kerf formation analysis in the abrasive waterjet cutting of industrial ceramics. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2002, **128**(1-3), 123-129 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00437-5. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602004375>

- [50] ARMITAGE, K. *Laser Assisted Machining of Hard-to-Wear Materials* [online]. Industrial Research Institute Swinburne, Swinburne University of Technology, 2010 [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <http://www.swinburne.edu.au/engineering/iris/pdf/profiles/KellyArmitage.pdf>
- [51] ROZZI, J., F. INCROPERA a Y. SHIN. Transient, three-dimensional heat transfer model for the laser assisted machining of silicon nitride: II. Assessment of parametric effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2000, **43**(8), 1425-1437 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/S0017-9310(99)00219-7. ISSN 00179310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931099002197>
- [52] BRECHER, C., M. EMONTS, C.-J. ROSEN a J.-P. HERMANI. Laser-assisted Milling of Advanced Materials. *Physics Procedia* [online]. 2011, **12**, 599-606 [cit. 2018-08-08]. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.076. ISSN 18753892. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389211001556>
- [53] Laser-assisted machining will make ceramic parts less costly. In: *PURDUE UNIVERSITY* [online]. West Lafayette (Indiana, USA): Laser-Assisted Materials Processing Lab, School of Mechanical Engineering, 2000 [cit. 2017-06-09]. Dostupné z: <http://www.purdue.edu/uns/html4ever/0004.Shin.ceramics.html>
- [54] PACHAURY, Y. a P. TANDON. An overview of electric discharge machining of ceramics and ceramic based composites. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2017, **25**(1), 369-390 [cit. 2018-06-09]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.12.010. ISSN 15266125. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612516301815>
- [55] PATEL, K., P. PANDEY a P. VENKATESWARA RAO. Surface integrity and material removal mechanisms associated with the EDM of Al₂O₃ ceramic composite. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. 2009, **27**(5), 892-899 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2009.05.003. ISSN 02634368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263436809000730>
- [56] LANDFRIED, R., F. KERN, W. BURGER, W. LEONHARDT a R. GADOW. Wire-EDM of ZTA-TiC Composites with Variable Content of Electrically Conductive Phase. *Key Engineering Materials* [online]. 2012, **504-506**, 1165-1170 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.504-506.1165. ISSN 16629795. Dostupné z: <http://www.scientific.net/KEM.504-506.1165>
- [57] TANI, T. Machining phenomena in WEDM of insulating ceramics. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2004, **149**(1-3), 124-128 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.12.027. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013604001402>

- [58] FUKUZAWA, Y., N. MOHRI, H. GOTOH a T. TANI. Three-dimensional machining of insulating ceramics materials with electrical discharge machining. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2009, **19**, 150-156 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60263-4. ISSN 10036326. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1003632610602634>
- [59] KOZAK, J., K. RAJURKAR a N. CHANDARANA. Machining of low electrical conductive materials by wire electrical discharge machining (WEDM). *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2004, **149**(1-3), 266-271 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.055. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013604001657>
- [60] GUO, Y., J. BAI, G. DENG a Z. LU. High Speed Wire Electrical Discharge Machining (HS-WEDM) Phenomena of Insulating Sisub3/subNsub4/sub Ceramics with Assisting Electrode. *Key Engineering Materials* [online]. 2007, **339**, 281-285 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.339.281. ISSN 16629795. Dostupné z: <http://www.scientific.net/KEM.339.281>
- [61] LIU, Y. Effect of machining fluid on the process performance of electric discharge milling of insulating Al₂O₃ ceramic. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2008, **48**(9), 1030-1035 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.12.011. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695508000084>
- [62] LIN, Y. Machining Characteristics of EDM for Non-Conductive Ceramics Using Adherent Copper Foils. *Advanced Materials Research* [online]. 2010, **154-155**, 794-805 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.154-155.794. ISSN 16628985. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.154-155.794>
- [63] MOHRI, N., Y. FUKUZAWA, T. TANI a T. SATA. Some Considerations to Machining Characteristics of Insulating Ceramics-Towards Practical Use in Industry-. *CIRP Annals* [online]. 2002, **51**(1), 161-164 [cit. 2018-06-17]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61490-5. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607614905>
- [64] RAO, X., F. ZHANG, Ch. LI a Y. LI. Experimental investigation on electrical discharge diamond grinding of RB-SiC ceramics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2018, **94**(5-8), 2751-2762 [cit. 2018-06-08]. DOI: 10.1007/s00170-017-1102-7. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-017-1102-7>
- [65] SCHOTH, A., R. FÖRSTER a W. MENZ. Micro wire EDM for high aspect ratio 3D microstructuring of ceramics and metals. *Microsystem Technologies* [online]. 2005, **11**(4-5), 250-253 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1007/s00542-004-0399-y. ISSN 09467076. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00542-004-0399-y>

- [66] KOZAK, J. a Z. GULBINOWICZ. The Mathematical Modeling and Computer Simulation of Rotating Electrical Discharge Machining. In: *World Congress on Engineering and Computer Science 2009* [online]. Hong Kong: International Association of Engineers, 2009 [cit. 2017-06-12]. ISBN 9789881821027.
- [67] JI, R-J. Compound machining of silicon carbide ceramics by high speed end electrical discharge milling and mechanical grinding. *Chinese Science Bulletin* [online]. 2012, **57**(4), 421-434 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1007/s11434-011-4822-3. ISSN 10016538. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11434-011-4822-3>
- [68] CHUNG, D., B. KIM a Ch. CHU. Micro electrical discharge milling using deionized water as a dielectric fluid. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2007, **17**(5), 867-874 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1088/0960-1317/17/5/004. ISSN 09601317. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0960-1317/17/i=5/a=004?key=crossref.e1f2ffc7f2d3593b75b2c5b9c19aeef4>
- [69] XU, M., X. LUO a J. ZHANG. Study on Thermal Stress Removal Mechanisms of Hard and Brittle Materials During Ultrasonic Vibration Assisted EDM in Gas. In: *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation* [online]. Shanghai, China: IEEE, 2011, s. 597-600 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1109/ICMTMA.2011.720. ISBN 9781424490103. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5721557/>
- [70] CHANG, W. Study on the Mechanism of Ultrasonic Vibration Aided Electrical Discharge Milling in Deionized Water. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2011, **130-134**, 1344-1347 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.130-134.1344. ISSN 16627482. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMM.130-134.1344>
- [71] MOHD ABBAS, N., D. SOLOMON a Md. BAHARI. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2007, **47**(7-8), 1214-1228 [cit. 2017-06-09]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695506002148>
- [72] LI, H., T. YU, Z. WANG, L. ZHU a W. WANG. Detailed modeling of cutting forces in grinding process considering variable stages of grain-workpiece micro interactions. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2017, **126**, 319-339 [cit. 2018-07-08]. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.11.016. ISSN 00207403. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740316308268>
- [73] MALKIN, S. a Changsheng GUO. *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives*. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2008. ISBN 9780831132477.

- [74] BIFANO, T.G., J. ARNOLD, R. PARKS, T. DOW a R.O. SCATTERGOOD. Ductile-Regime Grinding Of Brittle Materials: Experimental Results And The Development Of A Model. In: *Proceedings Volume 0966, Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics* [online]. San Diego, CA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 1989, s. 108-116 [cit. 2018-07-13]. DOI: 10.1117/12.948055. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.948055>
- [75] ZHONG, Z. a V. VENKATESH. Semi-Ductile Grinding and Polishing of Ophthalmic Aspherics and Spherics*. *CIRP Annals* [online]. 1995, **44**(1), 339-342 [cit. 2018-06-16]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62338-5. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607623385>
- [76] LI, B., J. NI, J. YANG a S. LIANG. Study on high-speed grinding mechanisms for quality and process efficiency. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014, **70**(5-8), 813-819 [cit. 2018-07-08]. DOI: 10.1007/s00170-013-5297-y. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-013-5297-y>
- [77] ZHONG, Z. Ductile or Partial Ductile Mode Machining of Brittle Materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2003, **21**(8), 579-585 [cit. 2018-06-16]. DOI: 10.1007/s00170-002-1364-5. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-002-1364-5>
- [78] ZHANG, B., X. ZHENG, H. TOKURA a M. YOSHIKAWA. Grinding induced damage in ceramics. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2003, **132**(1-3), 353-364 [cit. 2018-06-16]. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00952-4. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602009524>
- [79] MARINESCU, I. Double fracture model in lapping of ceramics. In: *Proc. of Precision Grinding of Brittle Materials 1996 Spring ASPE Topical Meeting*. Maryland, 1996, s. 88-94.
- [80] MARINESCU, I. *Handbook of machining with grinding wheels*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an Informa business, 2016. ISBN 9781482206685.
- [81] HUMÁR, A. *Technologie I: Technologie obrábění – 3. část* [online]. 1. Brno: Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2005 [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf

- [82] AGARWAL, S. a P. VENKATESWARA RAO. Predictive modeling of force and power based on a new analytical undeformed chip thickness model in ceramic grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2013, **65**, 68-78 [cit. 2018-07-20]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.10.006. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695512001897>
- [83] LI, K. a W. LIAO. Modelling of ceramic grinding processes Part I. Number of cutting points and grinding forces per grit. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 1997, **65**(1-3), 1-10 [cit. 2018-07-20]. DOI: 10.1016/0924-0136(95)02232-5. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0924013695022325>
- [84] MISHRA, V. a K. SALONITIS. Empirical Estimation of Grinding Specific Forces and Energy Based on a Modified Werner Grinding Model. *Procedia CIRP* [online]. 2013, **8**, 287-292 [cit. 2018-07-20]. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.104. ISSN 22128271. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827113003818>
- [85] Test&Measurement Force and Strain: Measurement Equipment for Demanding T&M Applications. In: *Kistler Group* [online]. Winterthur, Switzerland: Kistler Group, 2018 [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=361&model=download&callee=frontend>
- [86] Force Sensors. In: *Kistler Group* [online]. Winterthur, Switzerland: Kistler Group, 2016 [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=278&model=download&callee=frontend>
- [87] NĚMEČEK, P. a E. TOMEH. *VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA ZÁKLADNÍCH ZÁVAD STROJŮ* [online]. 1. Liberec: TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů, 2010 [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1851>
- [88] LUKOVICS, P. *Vliv vibrací broušicího nástroje na strukturu broušeného povrchu*. Brno, 2013, 127 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [89] ŽIVOTSKÝ, P. *Chybové frekvence ložisek*. Brno, 2008. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Daniel Zuth.

- [90] CHVOJKA, P. Vibrační diagnostikou ke zlepšení kvality obrobeného povrchu. *Řízení a údržba průmyslového podniku* [online]. Český Těšín: Trade Media International, 2017 [cit. 2018-04-22]. ISSN 1803-4535. Dostupné z: [http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=7373&cHash=1529820f33&type=98](http://udrzbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=7373&cHash=1529820f33&type=98)
- [91] HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I, TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. 1. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003 [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [92] FIALA, Z. *Vibrace při obrábění kovů*. Brno, 2010, 63 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [93] TŮMA, J. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
- [94] Diskrétní signál. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Diskr%C3%A9tn%C3%AD_sign%C3%A1l
- [95] BORTLÍK, P. *Vibrodiagnostický systém*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Beneš, PhD.
- [96] Fourierova transformace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2018-08-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Fourierova_transformace
- [97] BUMBÁLEK, B. Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. *Kvalita a Geometrické specifikace produktů* [online]. 2005, 1(5), 1-6 [cit. 2018-06-06]. ISSN 1801-5352. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
- [98] NOVÁK, M. a F. HOLEŠOVSKÝ. Studium integrity broušeného povrchu. *Manufacturing Engineering*. Prešov: FVT TU Košice, 2008, 1(1), 11-13. ISSN 1335-7972.
- [99] JAWAHIR, I.S., E. BRINKSMEIER, R. M'SAOUBI, D.K. ASPINWALL, J.C. OUTEIRO, D. MEYER, D. UMBRELLO a A.D. JAYAL. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals* [online]. 2011, 60(2), 603-626 [cit. 2018-06-06]. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.05.002. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850611002046>

- [100] KŘÍŽ, A. Vliv povrchu na užité vlastnosti výrobku. In: *Strojírenská technologie Plzeň 2011: sborník příspěvků* [online]. Vyd. 1. Plzeň: ZČU v Plzni, 2011, s. 1-12 [cit. 2018-06-06]. ISBN 978-80-7043-934-0.
- [101] METELKOVÁ, J. *Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu*. Brno, 2014, 77 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
- [102] SMITH., G. *Industrial Metrology Surfaces and Roundness*. 1. London: Springer London, 2002. ISBN 9781447138143.
- [103] *FORM TALYSURF INTRA: Operator's Handbook*. 1.5. Leicester, England: Taylor Hobson, 2002. Dostupné také z: https://www.taylor-hobson.com.de/-/media/ametektaylorhobson/files/learning%20zone/user%20guides/form%20tallysurf%20intra%20handbook%201_5.pdf?la=de-de
- [104] Form Talysurf Intra. In: *AMETEK.Inc* [online]. Leicester, England: Taylor Hobson, 2012 [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorhobson/files/product%20downloads/shop%20floor%20intra/fts%20intra%20brochure_lowres_en.pdf?la=en
- [105] Surface Finish Measurement Methods and Instrumentation. In: *Ametek Inc.* [online]. Taylor Hobson Centre of Excellence, 2000 [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorhobson/files/learning%20zone/teleconference%20archives/surface%20finish%20measurement%20methods%20and%20instrumentation.pdf?la=en>
- [106] *Focus-Variation: The technical principle* [online]. Alicona Imaging GmbH, 2018 [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <https://www.alicon.com/focus-variation/>
- [107] InfiniteFocus: Technical Specifications. *Alicona Imaging GmbH* [online]. 2018 [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <https://www.alicon.com/products/infinitefocus/>
- [108] WDOWIK, R., Z. GUO a G. CHANG. Application of focus-variation Technique in Measurements of Ultrasonic Vibrations of Grinding pins. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2015, **35**, 02006- [cit. 2018-06-06]. DOI: 10.1051/mateconf/20153502006. ISSN 2261-236X. Dostupné z: <http://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/20153502006>
- [109] MANDÁT, D. *Optické bezkontaktní topografické metody* [online]. 1. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012 [cit. 2018-06-06]. ISBN ISBN 978-80-244-3075-1. Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/system/files/slo/rcptm/texty/Mandat-Opticke_bezkontaktni_topograficke_metody.pdf

- [110] VORBURGER, T. Optical Methods of Surface Measurement. In: *NIST* [online]. Gaithersburg, 2012 [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/oles/3-Vorburger-Ted-Optical-Methods-of-Surface-Measurement-MSSFAA-10jul12.pdf>
- [111] Aplikace strojového vidění v dopravním provozu. In: *Seeking Alpha* [online]. 2017 [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: https://static.seekingalpha.com/uploads/2017/1/28/294191-14856434267161448_origin.png
- [112] Bin Picking. In: *Průmyslové roboty řešení od Blumenbecker | Blumenbecker Robotics* [online]. B+M Blumenbecker GmbH, 2018 [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: https://www.robotics.blumenbecker.com/typo3conf/ext/microsite_robotik/Resources/Public/Images/02.png
- [113] Camera Calibration and 3D Reconstruction: OpenCV 2.4.13.6 documentation. In: *Opencv dev team* [online]. 2018 [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html?highlight=calib
- [114] BRADSKI, G. a A. KAEHLER. *Learning OpenCV 3: Calibration Patterns Used by OpenCV* [online]. 1. Vyd. O'Reilly Media, Inc., 2016 [cit. 2018-06-27]. ISBN 9781491937983.
- [115] Optics. In: *Opto Engineering* [online]. b.r. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: https://www.opto-engineering.com/media/downloads/docs/Basics_Optics_EN.pdf
- [116] Moissanite. *MINERAL-databáze mineralů* [online]. b.r. [cit. 2017-06-08]. Dostupné z: http://www.mineral.cz/database/mineraly_detail.php?index=3030&stavvyberu=jesel&stranka=800.
- [117] RICCIARDI, C. *CVD growth and characterization of 3C-SiC thin films* [online]. Chivasso, 2004 [cit. 2012-08-20]. Dostupné z: <http://areeweb.polito.it/ricerca/micronanotech/Papers/thesis-carlo.pdf>. Disertační práce. Politecnico di Torino, Materials and microsystems laboratory of Chivasso. Vedoucí práce Prof. Fabrizio Pirri.
- [118] HARRIS., G. *Properties of silicon carbide*. 1. London [u.a.]: INSPEC, 1995. ISBN 0852968701.
- [119] Materiály – charakteristické vlastnosti. In: *CeramTec Czech Republic* [online]. Šumperk: CeramTec Czech Republic s.r.o., 2011 [cit. 2011-02-21]. Dostupné z: <http://www.ceramtec.com/co/cz/materialy/00139,0001,0000,5138.php>

- [120] *Brousicí kotouče z diamantu a kubického nitridu boru* [online]. Šumperk: Urdiamant, s.r.o., 2007 [cit. 2017-06-09]. Dostupné z:
<http://www.urdiamant.cz/wpimages/other/doc2/BK.pdf>
- [121] *BPH 320 A-Návod k obsluze*. Holice: BSH Holice a.s. – A JUNKER GROUP COMPANY, 2000, Stat' 1/3-1/4.
- [122] (Diskrétní) Fourierova transformace. In: *Apfyz.upol.cz* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2004 [cit. 2018-07-28]. Dostupné z:
<http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/mini/fourtrans.pdf>
- [123] *RT Pro - Dynamic Signal Analysis: User Guide Rev. 5.5. 1*. Fremont, CA: Dactron, a division of Ling Dynamics Systems /SPX Corporation, 2004.

Seznam zkratk a symbolů

I. Seznam zkratk

A/D:	analogově digitální	
Al	Chemická značka - hliník	
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý	
α-SiC		
ASJM	Abrasive Suspension Jet Machining	Obrábění Abrazivní Suspenzí
AWJM	Abrasive Water Jet Machining	Obrábění abrazivním vodním paprskem
B ₄ C	Karbid boru	
β-SiC		
C	Chemická značka - uhlík	
CCLD	Constant Current Line Drive	Napájení konstantním proudem
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer	Polymer vyztužený uhlíkovými vlákny
CNC	Computer Numeric Control	
CO	Oxid uhlekatý	
D/A	Digitálně analogový	
DFT	Diskrétní Fourierova Transformace	
EDG	Electrical Discharge Grinding	Elektroerozivní broušení
EDM	Electrical Discharge Machining	Elektroerozivní obrábění
ELID	Electrolytic In-process dressing	Elektrolitické orovnávaní brousících kotoučů během procesu
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií	
FFT	Fast Fourier Transform	Rychlá Fourierova transformace
FSI	Fakulta strojního inženýrství	
IFM	Infinite Focus Microscope	
MEDM	Milling EDM	Elektroerozivní frézování
N	Chemická značka - dusík	
NbC	Karbid niobu	
NMO	Nekonvenční metody obrábění	
O	Chemická značka - kyslík	
pH	Pondus hydrogenia	Vodíkový exponent
REDM	Rotating EDM	Elektroerozivní obrábění s rotující elektrodou
RUD	Rotary Ultrasonic Drilling	Rotační ultrazvukové vrtání
RUM	Rotary Ultrasonic Machining	Rotační ultrazvukové obrábění
Si	Chemická značka - křemík	
Si ₃ N ₄	Nitrid křemíku	
SiC	Karbid křemíku	
SiO ₂	Oxid křemičitý	

SiSiC	Karbid křemíku infiltrovaný křemíkem	
TiB ₂	Borid titanu	
TiC	Karbid titanu	
TiCN	Karbonitrid titanu	
TiN	Nitrid titanu	
UEDM	Ultrasonic assisted EDM	Elektroerozivní obrábění za asistence ultrazvuku
USM	Ultrasonic Machining	Ultrazvukové obrábění
ÚST	Ústav strojírenské technologie	
VUT v Brně	Vysoké učení technické v Brně	
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining	Elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou
wH(k)	Okénková (oknová) funkce typu Hanning	
WJM	Water Jet Machining	Obrábění vodním paprskem
X, Y, Z	Koordináty 3D bodu v reálném prostoru	
ZrO ₂	Oxid zirkoničitý	

II. Seznam symbolů

A		Amplituda
A _f		Plocha povrchu vytvořeného křehkým lomem
C	mm ²	Počet aktivním ostří na jednotku plochy (povchová hustota zrn brusiva)
E	MPa	Modul pružnosti
E _f		Energie potřebná ke křehkému lomu
E _p		Energie potřebná k plastické deformaci
F(t)	N	Periodicky proměnlivá budící síla
F _n	N	Normálová složka řezné síly
F _n '	N/mm	Měrná normálová složka řezné síly
F _t	N	Tangenciální složka řezné síly při broušení
F _t '	N/mm	Měrná tangenciální složka řezné síly
G		Poměrný obrus
G _c		Griffitův parametr šíření trhliny
HV		Tvrdost dle Vickerse
K _{IC}	MPa.m ^{1/2}	Lomová houževnatost
N	s	Doba záznamu
P	W	Výkon broušení
Q'	mm ³ /mm/s	Specifická rychlost úběru
Ra	mm	Střední aritmetická úchylka povrchu
R _e	MPa	Napětí na mezi kluzu
R _{m0}	MPa	Pevnost v ohybu
R _{mt}	MPa	Pevnost v tlaku
Rz	mm	Největší výška rofilu
T	s	Perioda
V _p	mm ³	Objem materiálu k lastické deformaci při broušení
V _s	mm ³	Opotřeбенí nástroje, úběr materiálu brousicího kotouče
V _w	mm ³	Úběr materiálu obrobku
X(ω):		Fourierovo spektrum
a _e	mm	Hloubka záběru (radiální posuv)
b _w	mm	Šířka broušení
c _x , c _y	mm	Souřadnice středového bodu
d	mm	Hloubka řezu, <i>označení terminologicky používané pro vyjádření "kritéria kritické hloubky řezu"</i>
d _c	mm	Kritická hloubka řezu
d _e	mm	Ekvivalent průměru brousicího kotouče
d _s	mm	Průměr brousicího kotouče

d_w	mm	Průměr obrobku
e_c	$J \cdot mm^{-2}$	Měrná energie broušení
f	s^{-1}	Frekvence
f_a	mm	Příčný posuv (axiální)
f_N	s^{-1}	Nyquistova frekvence
f_r	mm	Radiální posuv = ae
f_x, f_y	mm	Ohniskové vzdálenosti vyjádřené v pixelech
h_{eq}	mm	Ekvivalentní tloušťka broušení
h_m	mm	Maximální nedeformovaná tloušťka třísky
k		Tuhost uložení tělesa
l_e	mm	Skutečná délka styku kotouče s obrobkem
l_g	mm	Geometrická délka styku kotouče s obrobkem
l_k	mm	Kinematická délka styku kotouče s obrobkem
l_n	mm	Vyhodnocovaná délka profilu
l_p	mm	Základní délka profilu
l_r	mm	Základní délka profilu drsnosti
l_w	mm	Základní délka profilu vlnitosti
m	kg	Hmotnost
n_s	min^{-1}	Otáčky brousicího kotouče
q		Poměr rychlostí při broušení
r		Poměr šířky k tloušťce třísky
t	s^{-1}	Čas
u, v		Koordináty pixelů projektovaného bodu
v_c	$m \cdot s^{-1}$	Řezná rychlost
v_f	$m \cdot min^{-1}$	Posuvová rychlost obrobku
v_{ft}	$m \cdot min^{-1}$	Tangenciální rychlost posuvu stolu brusky
μ		Poissonovo číslo
α	rad/s	Úhlová rychlost
λ	$10^{-6} \cdot K^{-1}$	Koeficient tepelné roztažnosti
ρ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Tepelná vodivost
ρ	$g \cdot cm^{-3}$	Hustota
ω	$\Omega \cdot cm$	Měrný elektrický odpor
λ_c		Mezní vlnová délka (cut-off)
π		Ludolfovo číslo
φ		Počáteční fáze

Seznam obrázků

- Obr. 0.1 Vývoj hodnoty trhu s keramickými materiály [5]*
- Obr. 2.1 Typy vazeb materiálech a) iontová vazba b) kovalentní vazba c) kovová vazba [6]*
- Obr. 2.2 Porovnání různých druhů materiálů v závislosti na tvrdosti a lomové pevnosti [7]*
- Obr. 2.3 Princip ELID broušení [12]*
- Obr. 2.4 Mechanismus elektrolytického orovnávání kotouče během broušení [21]*
- Obr. 2.5 Princip stroje pro obrábění ultrazvukem [9]*
- Obr. 2.6 Schéma mechanismu úběru materiálu během ultrazvukového obrábění [9]*
- Obr. 2.7 Schéma principu RUM [38]*
- Obr. 2.8 Aplikace RUM – obrábění součásti z pokročilé keramiky [39]*
- Obr. 2.9 Tryska pro řezání abrazivním vodním paprskem [40]*
- Obr. 2.10 Povrch vzorku z karbidu křemíku SiSiC vytvořený řezáním abrazivním vodním paprskem*
- Obr. 2.11 Příklady „horkého“ obrábění keramiky nástroji s definovanou geometrií břitu*
- Obr. 2.12 EDM pomocí asistenční elektrody ve dvou nejpoužívanějších modifikacích a) elektroerozivní hloubení, b) elektroerozivní drátové řezání [63]*
- Obr. 2.13 Princip hybridní metody elektroerozivní broušení [64]*
- Obr. 3.1 Schéma zóny broušení a detaily dvou brousicích zrn v místě A a B [7]*
- Obr. 3.2 Mechanismy působící při broušení [72]*
- Obr. 3.3 Mechanismus tvorby trhlin při vtisku indentoru [7]*
- Obr. 3.4 Schématický diagram plastické deformace, radiálních (R) a laterálních (L) trhlin vznikajících při indentační zkoušce křehkých materiálů [7]*
- Obr. 3.5 Schéma přechodu mezi tvárným a křehkým úběrem dle Miyashita [75]*
- Obr. 3.6 Vliv tepelného šoku na pevnost keramik [76]*
- Obr. 3.7 Modifikovaný Konigův a Sinhoffův model vysvětlující broušení v částečně tvárném režimu [7]*
- Obr. 3.8 Schéma zóny indukované v podpovrchové vrstvě materiálu během scratch-testu, která je ovlivněna pulverizací [7]*
- Obr. 3.9 Makrolom v keramickém materiálu [7]*
- Obr. 3.10 Metody rovinného obvodového broušení [80]*
- Obr. 3.11 Kinematika rovinného obvodového broušení [81]*
- Obr. 3.12 Schematické znázornění parametrů rovinného obvodového broušení [80]*
- Obr. 3.13 Porovnání konvenčního a hloubkového broušení [80]*
- Obr. 3.14 Charakteristiky procesu při různých metodách broušení [80]*
- Obr. 3.15 Rozklad řezné síly na jednotlivé složky [84]*
- Obr. 3.16 Úběr materiálu v zóně broušení se schematickým vyznačením složek řezné síly působící na jednotlivá zrna brusiva [72]*
- Obr. 3.17 Rozmístění dynamometrů při procesu rovinného broušení [80]*
- Obr. 3.18 Princip piezoelektrických dynamometrů [85]*
- Obr. 3.19 Časový průběh vlastních kmitů [88]*
- Obr. 3.20 Fyzikální model a časový průběh vynuceného kmitání [88]*

- Obr. 3.21 Rezonanční jev [88]
- Obr. 3.22 Klasifikace signálů [93]
- Obr. 3.23 Typy signálů [94]
- Obr. 3.24 Popis vlnových délek vlnitosti a drsnosti povrchu [101]
- Obr. 3.25 Měřicí dráha dotykového snímače a popis délek pro vyhodnocování struktury povrchu [88]
- Obr. 3.26 Schématické znázornění parametrů drsnosti R_a a R_z [88]
- Obr. 3.27 Kuželový dotyk s vrcholovým úhlem 90° kopíruje honovaný povrch – snímek SEM, zvětšení 200x [102]
- Obr. 3.28 Konstrukce hrotu a převodníku přístroje Form Talysurf Intra [104]
- Obr. 3.29 Schéma principu technologie „Focus-Variation“ [110]
- Obr. 3.30 Aplikace strojového vidění v dopravním provozu [111]
- Obr. 3.31 Uchopování náhodně uložených dílů na základě informace z kamery [112]
- Obr. 3.32 Schéma systému strojového vidění
- Obr. 3.33 Schéma modelu štěrbínové kamery [113]
- Obr. 3.34 Příklady kalibračních obrazců [114]
- Obr. 3.35 Typy zkreslení objektivu [113]
- Obr. 3.36 Schématické srovnání telecentrického objektivu s endocentrickým [115]
- Obr. 4.1 Struktura materiálu vzorku
- Obr. 4.2 Vodorovná rovinná bruska BPH320A
- Obr. 4.3 Schéma zapojení dynamometru při měření
- Obr. 4.4 Alicona IFM G4
- Obr. 4.5 Kalibrační destička Opto Engineering PT036-056
- Obr. 4.6 Sestava experimentu včetně souřadného systému
- Obr. 4.7 Porušení vzorku v důsledku nedokonalého upnutí do svěráku
- Obr. 4.8 Povrch vzorku po testovacím broušení
- Obr. 4.9 Schéma principu ověření tvaru brousicího kotouče
- Obr. 4.10 Popis jednotlivých etap broušení
- Obr. 4.11 Tangenciální složka měrné řezné síly v časové a frekvenční oblasti
- Obr. 4.12 Axiální složka měrné řezné síly v časové a frekvenční oblasti
- Obr. 4.13 Normálová složka měrné řezné síly v časové a frekvenční oblasti
- Obr. 4.14 Schématické znázornění vlivu válcovitosti na frekvenci kmitů
- Obr. 4.15 Schématické znázornění vlivu házení na frekvenci kmitů
- Obr. 4.16 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e1}=0,01\text{ mm}$ - vzorek 1A_vc1_vf1
- Obr. 4.17 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e2}=0,03\text{ mm}$ - vzorek 1A_vc1_vf1
- Obr. 4.18 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e3}=0,05\text{ mm}$ - vzorek 1A_vc1_vf1
- Obr. 4.19 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e3}=0,07\text{ mm}$ - vzorek 1A_vc1_vf1
- Obr. 4.20 Vliv radiálního záběru na silové působení a amplitudu kmitání vzorek 1A_vc1_vf1

- Obr. 4.21 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e1}=0,01$ mm - vzorek 4A_vc1_vf2
- Obr. 4.22 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e2}=0,03$ mm - vzorek 4A_vc1_vf2
- Obr. 4.23 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e3}=0,05$ mm - vzorek 4A_vc1_vf2
- Obr. 4.24 Časový průběh složek řezné síly tangenciální a normálové při hloubce záběru $a_{e3}=0,07$ mm - vzorek 4A_vc1_vf2
- Obr. 4.25 Vliv radiálního záběru na silové působení a amplitudu kmitání – 4A_vc1_vf2
- Obr. 4.26 Frekvenční spektra složek řezných sil pro v_{c1}
- Obr. 4.27 Frekvenční spektra složek řezných sil pro v_{c2}
- Obr. 4.28 Vliv posuvové a řezné rychlosti na silové působení a amplitudu kmitání
- Obr. 4.29 Optimální parametry Fourierovy transformace pro vzorky s nižší posuvovou rychlostí v_{f1} a v_{f2}
- Obr. 4.30 Optimální parametry Fourierovy transformace pro vzorky s posuvovou rychlostí v_{f3}
- Obr. 4.31 Grafický průběh oknové funkce Hanning pro 512 bodů
- Obr. 4.32 Efektivní hodnota signálu a plocha pod křivkou
- Obr. 4.33 Frekvenční spektra a průběhy dráhy v osách X, Y a Z pro vzorek 1A_vc1_vf1_a3
- Obr. 4.34 Zobrazení přítomnosti frekvence na úrovni 270 Hz
- Obr. 4.35 Frekvenční spektra a průběhy dráhy v osách X, Y a Z pro vzorek 4A_vc1_vf1_a3
- Obr. 4.36 Frekvenční spektra a průběhy dráhy v osách X, Y a Z pro vzorek 7A_vc1_vf1_a3
- Obr. 4.37 Frekvenční spektra a průběhy dráhy v osách X, Y a Z pro vzorek 4A_vc2_vf1_a3
- Obr. 4.38 Širokofrekvenční analýza vibrací stroje
- Obr. 4.39 Vzorek 1A_vc1_vf1_a3
- Obr. 4.40 Vzorek 4A_vc1_vf1_a3
- Obr. 4.41 Vzorek 7A_vc1_vf1_a3
- Obr. 4.42 Vzorek 1A_vc2_vf1_a3
- Obr. 4.43 Vzorek 4A_vc2_vf1_a3
- Obr. 4.44 Vzorek 7A_vc2_vf1_a3
- Obr. 4.45 Ukázka z kontaktního měření a detail vyhodnocované plochy
- Obr. 4.46 Závislost střední aritmetické úchytky povrchu na posuvové rychlosti.
- Obr. 4.47 Korelační diagram vzájemného vztahu mezi parametry drsnosti povrchu R_a , R_z a řeznou rychlostí v_c .
- Obr. 4.48 Korelační diagram vzájemného vztahu mezi parametry drsnosti povrchu R_a , R_z a řeznou rychlostí v_f .
- Obr. 4.49 Korelační diagram vzájemného vztahu mezi parametry drsnosti povrchu R_a , R_z a hloubkou záběru a_e .
- Obr. 4.50 Test normality pro statistický soubor naměřených hodnot R_a .
- Obr. 4.51 Test normality pro statistický soubor naměřených hodnot R_z .
- Obr. 4.52 Vyhodnocení vlnitosti povrchu vzorku 1A_vc1_vf1_a3
- Obr. 4.53 Vyhodnocení vlnitosti povrchu vzorku 4A_vc1_vf2_a3
- Obr. 4.54 Vyhodnocení vlnitosti povrchu vzorku 7A_vc1_vf3_a3

Obr. 4.55 Vyhodnocení vlnitosti povrchu vzorku 1A_vc2_vf1_a3

Obr. 4.56 Upnutí vzorku do plastových čelistí

Obr. 4.57 Povrch tří vzorků po opakovaném testování

Obr. 4.58 Popis jednotlivých etap broušení

Obr. 4.59 Tangenciální složka měrné řezné síly v časové a frekvenční oblasti

Obr. 4.60 Normálová složka měrné řezné síly v časové a frekvenční oblasti

Obr. 4.61 Širokofrekvenční analýza vibrací stroje

Obr. 4.62 Frekvenční spektra a průběhy dráhy v osách X, Y a Z pro vzorek 4B_vc1_vf2_a3

Seznam tabulek

- Tab. 3.1 Řezné podmínky při různých metodách broušení [80]*
Tab. 3.2 Vzájemné vztahy mezi veličinami popisujícími vibrace [93]
Tab. 3.3 Základní vlastnosti Fourierovy transformace [93]
Tab. 3.4 Délkové parametry [101]
Tab. 3.5 Tvarové parametry [101]
Tab. 3.6 Výškové parametry (výstupky a prohlubně) [101]
Tab. 3.7 Výškové parametry (průměrné hodnoty souřadnic [101]
Tab. 3.8 Křivky a odpovídající parametry [101]
Tab. 4.1 Fázové složení požitých vzorků a hustota jednotlivých fází [hm%].
Tab. 4.2 Mřížové parametry nalezených fází.
Tab. 4.3 Vlastnosti obráběného materiálu dle výrobce [119]
Tab. 4.4 Parametry broušícího kotouče 6-02 2-175-20/2 B-XV D107 K100 [120].
Tab. 4.5 Parametry brusky BPH 320A [121].
Tab. 4.6 Základní parametry přístroje Form Talysurf Intra
Tab. 4.7 Parametry nastavené při měření vzorků
Tab. 4.8 Soustava strojového vidění a parametry jednotlivých součástí
Tab. 4.9 Experimentální podmínky
Tab. 4.10 A - Označení vzorků podle kombinace řezných podmínek
Tab. 4.11 Hodnoty řezné síly, frekvence a amplitudy frekvence při změně záběru-vzorek 1A
Tab. 4.12 Hodnoty řezné síly, frekvence a amplitudy frekvence při změně záběru-vzorek 4A
Tab. 4.13 Číselná reprezentace vzdálenosti čar a jejich vzájemné srovnání
Tab. 4.14 Výsledky měření drsnosti povrchu kontaktní metodou
Tab. 4.15 B - Označení vzorků podle kombinace řezných podmínek
Tab. 4.16 Změřené parametry drsnosti povrchu při opakovaném testování